

IDENTIFICACIÓN DE LOS DATOS DEL PROYECTO

TEMA: Equipamiento para el laboratorio de Comunicaciones Ópticas

TÍTULO: Diseño de un sistema automático de medida de la constante de Planck en diodos LED

AUTOR: Javier Durán Ugena

TITULACIÓN: Sistemas de Telecomunicación

TUTOR: Miguel Ángel del Casar Tenorio

DEPARTAMENTO: DIAC

DIRECTOR: Vicente González Posadas

TRIBUNAL

PRESIDENTE: David Osés del Campo

VOCAL: Miguel Ángel del Casar Tenorio

VOCAL SECRETARIO: José María Rodríguez Martín

FECHA DE LECTURA: Septiembre 2013

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto fin de carrera se ha diseñado y construido un equipo de medida automático que permite realizar la medida de la constante de Planck utilizando los principios de Funcionamiento de los diodos LED.

El equipo de medida es totalmente automático gracias a la utilización de una placa controladora Arduino MEGA 2560, que se encarga de realizar la iluminación secuencial de cada LED, medir sus tensiones de funcionamiento, y de realizar los cálculos necesarios para hallar la constante de Planck. Todos los datos se muestran por una pantalla LCD de 16 caracteres por 2 líneas.

Para comprender el funcionamiento del sistema de medida automático se ha realizado un estudio detallado de cada uno de los sistemas que componen el equipo de medida. Se ha explicado el funcionamiento teórico de los diodos LED y el funcionamiento de los semiconductores. Se ha explicado los diversos tipos de semiconductores que se utilizan para los LED y las modificaciones que se les aplica para mejorar su eficiencia. Para poder comprender en qué consiste la constante de Planck se ha explicado los principios teóricos en que se basa, y se ha realizado una pequeña demostración de su cálculo.

Una vez visto todos los principios teóricos se ha pasado a realizar la explicación de cada uno de los grandes bloques que componen el sistema de medida automático. Estos bloques son la placa controladora Arduino, el sistema de iluminación LED, el sistema de control mecánico de LEDs, la pantalla LCD, el sistema de interrupciones y el sistema de alimentación.

Para poder observar el espectro de emisión de cada uno de los LED se ha utilizado un analizador de espectros óptico (OSA), el cual ha sido explicado con detenimiento.

El código de programación de Arduino ha sido explicado en forma de diagrama de flujo para una mayor facilidad de comprensión.

Se ha desarrollado un manual de usuario para facilitar el uso del sistema a cualquier usuario, en el que se ha introducido un ejemplo completo de funcionamiento.

PROJECT SUMMARY

In this final Project has designed and built an automatic measuring equipment which is able to measure the Planck's constant using the operation principles of the LEDs.

The measuring equipment is fully automated thanks to the use of an Arduino Mega 2560 controller board, which is responsible for conducting sequential illumination of each LED, measure their operating voltages, and perform the necessary calculations of find the Planck constant. All data is displayed by a LCD screen 16 character by 2 lines.

To understand the operation of the automatic measuring system has been made a detailed study of each of the systems that make the measurement equipment. It develops the theoretical performance of the LED and the operation of semiconductors. It explains the different types of semiconductors that are used for LEDs and the changes applied to improve efficiency. In order to understand what is the Planck constant has been explained the theoretical principles in which it is based, and a small demonstration of its calculation has been performed.

After seeing all the theoretical principles has been made the explanation of each of the main blocks that compose the automatic measuring system. These blocks are the Arduino controller board, LED lighting system, the mechanical control system LEDs, LCD screen, the interrupt system and feeding system.

To observe the emission spectrum of each of the LED has been used optical spectrum analyzer (OSA), which has been explained in detail.

The Arduino programming code has been explained in flowchart form for an easy understanding.

It has developed a manual to facilitate the use of system to any user, which has introduced a complete example of operation.

Die Wahrheit triumphiert nie,

ihre Gegner sterben nur aus

La verdad nunca triunfa,

simplemente sus oponentes se van muriendo.

Max Planck (1858-1947) Físico alemán.

Agradecimientos

La realización de este proyecto fin de carrera y de la carrera ha resultado un trabajo largo, pero ameno, con muchas decepciones y alegrías, pero que no podría haber realizado sin una serie de personas que me han apoyado y ayudado. Por ello, quiero agradecerles a todas esas personas que han estado conmigo durante todo este tiempo.

En primer lugar, a mi tutor, Miguel Ángel, por darme la posibilidad de realizar tan magnífico proyecto, un proyecto que ha supuesto para mí un verdadero disfrute. Agradecerle todo su apoyo, ayuda e interés, agradecerle que se volcase en intentar ayudarme en todo lo posible. Además, agradecerle sus clases de Electrónica de Comunicaciones I y II, que hicieron que me ilusionase más aún con la rama de electrónica de la carrera.

La conclusión de mis estudios no hubiese sido posible sin todos los compañeros que me han acompañado estos años. Esos compañeros con los que he pasado horas, días, semanas y meses interminables en la biblioteca, con los que cualquier momento de respiro hacían que pudiese recuperar fuerzas y valor para volver a entrar a ese edificio en el que pasábamos más horas que en nuestra casa. Gracias a Adri, Rober, Jaime, David, Carlos, Hugo y Gonzalo, sin todos vosotros esto no hubiese sido posible.

Por su puesto, agradecerles a mis amigos de Rivas, a todos los que me han apoyado, motivado y animado para acabar la carrera. Gracias a todos ellos que han compartido mis momentos de desconexión, todas esas tardes tomando algo, esos fines de semana de escapadas a pueblos, a Salamanca, a la playa. Darle las gracias a todos ellos, a todos los que cada vez que me veían me preguntaban que como iba, que como lo llevaba, que mucho ánimo. Gracias Javi, Dani, Adri, Cris, Herni, Luna, Zazu y Álvaro (gracias por darme a conocer Arduino), gracias a todos por estar ahí.

También agradeceré al resto de amigos con los que comparto mi vida, a todos lo que son una parte muy importante de todo esto, por su apoyo, esos viajes, esas tardes y noches, los momentos de desconexión, las horas de charlas intrascendentes, por compartir mis hobbies. Gracias a Pedro y Pascual, a los de la Logia, Javi y Álvaro, a Luis y Carlos, y a Mario y Belén.

Pero los que de verdad, más que nadie, me han apoyado fielmente en todo momento, los que siempre han creído y confiado en mí, han sido mis padres y hermana. Gracias por hacer que sea quien soy, por educarme con esa sabiduría, por compartir mis horas de juego de pequeño, por estar continuamente en mi habitación, por tener la relación que tenemos, por todo lo bueno y lo malo que tengo, por comprenderme, por no presionarme, por hacer de mí una persona íntegra y con principios, por espolearme a que alcanzase las más altas cotas, por ayudarme en esas sesiones de mecanizado, por preocuparos por mí en todo momento, por estar siempre ahí, en cualquier momento y para todo. ¡Os quiero!

Y por último, darle las gracias a Sonia. La persona con la que he compartido todos estos años, y con la que compartiré todos los que estén por venir. La que sin su paciencia infinita, su comprensión y apoyo nada de esto hubiese sido posible. Gracias por quererme como solo tú sabes y podrías, por aceptar mis manías, mis excentricidades, por aceptarme como soy sin ninguna condición. Por esa paz que alcanzo cuando estoy contigo. Gracias por ser como eres, por ser tú, y por compartirlo conmigo. Te quiero, Sonia, este proyecto es para ti.

Madrid, 15 de Septiembre de 2013

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I. INTRODUCCIÓN	2
II. FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE MEDIDA	5
II.1. Funcionamiento de diodos LED	5
II.1.1. Electroluminiscencia.....	6
II.2. Materiales semiconductores.....	7
II.2.1. Semiconductores intrínsecos	8
II.2.2. Semiconductores extrínsecos	9
II.2.3. Semiconductores tipo P	9
II.2.4. Semiconductores tipo N	10
II.3. Estructura de bandas	12
II.3.1. Nivel de Fermi	13
II.3.2. Función de Fermi	14
II.3.3. Densidad de Estados de Energía (DOS).....	15
II.4. Banda prohibida (band-gap)	16
II.4.1. Semiconductores de GAP directo y GAP indirecto.....	17
II.4.2. Recombinación radiactiva	19
II.5. Estructura de diodos LED semiconductores	21
II.5.1. Heteroestructuras.....	22
II.5.2. Confinamiento de electrones.....	26
II.6. La constante de Planck	29
III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	33
III.1. Diagrama de bloques.....	33
III.2. Arduino	34
III.3. Sistema de iluminación LED	37

III.4. Sistema de control mecánico de LEDs	41
III.5. Pantalla LCD.....	45
III.6. Sistema de interrupciones	48
III.7. Sistema de alimentación	52
III.8. Analizador de Espectros Ópticos (OSA).....	54
III.9. Programa de simulación para Arduino	56
IV. DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL ARDUINO.....	59
V. MANUAL DE USUARIO	64
VI. PRESUPUESTO	90
VII. CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	98
ANEXO 1.....	99
Datasheet.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Polarización directa de un diodo LED	5
2.1 Estructura de bandas de un semiconductor.....	7
2.2. Aceptación de un semiconductor tipo P	9
2.3. Semiconductor tipo P	10
2.4. Donación de un semiconductor tipo N.....	10
2.5. Semiconductor tipo N	11
2.6. Estructura de bandas para metales, aislantes y semiconductores	12
2.7. Niveles de Fermi en semiconductores tipo N y tipo P	13
2.8. Función de Fermi	14
2.9. Población de electrones en la banda de conducción	15
2.10. Estructura de la banda semiconductor	16
2.11. Relación entre la energía de la band-gap (eV) y la temperatura (K) .	17
2.12. Transmisión de electrón en GAP directo	18
2.13. Transmisión de electrón en GAP indirecto	18
2.14. Recombinación radiativa	20
2.15. Unión P-N de un semiconductor.....	21
2.16. Homounión y heterounión.....	23
2.17. Heteroestructura abrupta	24
2.18. Heteroestructura graduada	24
2.19. Escape de portadores en heteroestructura dobles	25
2.20. Esquema de pozo cuántico	27
2.21. Pozo cuántico visto con un microscopio de transmisión	27
3.1. Diagrama de bloques	33
3.2. Arduino Mega 2560.....	34
3.3. Interfaz del programa de desarrollo de Arduino.....	35

3.4. Simulación del sistema de iluminación LED.....	37
3.5. Placa de circuito impreso del sistema de iluminación LED	38
3.6. Montaje real del sistema de iluminación LED	39
3.7. Medidor de potencia HP 8140A	40
3.8. Motor paso a paso Bipolar	41
3.9. Esquema de un motor PaP Bipolar.....	42
3.10. Controlador EasyDriver	42
3.11 Simulación del sistema de control mecánico de LEDs.....	43
3.12. Montaje real del sistema de control mecánico de LEDs	44
3.13. Pantalla LCD 16x2	45
3.14 Simulación del sistema de la pantalla LCD	46
3.15. Montaje real del sistema de la pantalla LCD (1).....	47
3.16. Montaje real del sistema de la pantalla LCD (2).....	47
3.17. Interrupción sin schmitt trigger	48
3.18. Interrupción con schmitt trigger	49
3.19. Simulación del sistema de interrupción.....	50
3.20. Placa de circuito impreso del sistema de interrupción.....	50
3.21. Montaje real del sistema de interrupción	51
3.22. Conectores de banana	52
3.23 Placa de circuito impreso del sistema de alimentación.....	52
3.24 Simulación del sistema de alimentación.....	53
3.25 Montaje real del sistema de alimentación	53
3.26. Espectro de una fuente LED.....	54
3.27. Red de difracción	55
3.28. Analizador de espectros óptico disponible para el PFC.....	55
3.29. Pantalla de inicio de VBB	56
3.30 Pantalla principal de diseño de VBB	57

3.31 Selección de Arduino en VBB	57
5.1 Fuente de alimentación.....	64
5.2 Conexión de alimentación del equipo de medida	65
5.3 Conexión de la FO en el equipo de medida	65
5.4 Conexión de la FO en el analizador de espectros	66
5.5 Pantalla de inicio	66
5.6 Estado de LEDs al inicio.....	67
5.7 Incremento de la tensión LED 1	67
5.8 Tensión LED 1	68
5.9 Constante de Planck LED 1	68
5.10 Pantalla de bucle infinito	69
5.11 Espectro de LED 1 – Longitud de onda.....	69
5.12 Espectro de LED 1 – Nivel de señal.....	70
5.13 LED 2 enfrentado a la FO.....	70
5.14 Incremento de la tensión LED 2	71
5.15 Tensión LED 2	71
5.16 Constante de Planck LED 2	72
5.17 Espectro de LED 2 – Longitud de onda.....	72
5.18 Espectro de LED 2 – Nivel de señal.....	73
5.19 LED 3 enfrentado a la FO.....	73
5.20 Incremento de la tensión LED 3	74
5.21 Tensión LED 3	74
5.22 Constante de Planck LED 3	75
5.23 Espectro de LED 3 – Longitud de onda.....	75
5.24 Espectro de LED 3 – Nivel de señal.....	76
5.25 LED 4 enfrentado a la FO.....	76
5.26 Incremento de la tensión LED 4	77

5.27 Tensión LED 4	77
5.28 Constante de Planck LED 4	78
5.29 Espectro de LED 4 – Longitud de onda.....	78
5.30 Espectro de LED 4 – Nivel de señal	79
5.31 LED 5 enfrentado a la FO.....	79
5.32 Incremento de la tensión LED 5	80
5.33 Tensión LED 5	80
5.34 Constante de Planck LED 5	81
5.35 Espectro de LED 5 – Longitud de onda.....	81
5.36 Espectro de LED 5 – Nivel de señal	82
5.37 LED 6 enfrentado a la FO.....	82
5.38 Incremento de la tensión LED 6	83
5.39 Tensión LED 6	83
5.40 Constante de Planck LED 6	84
5.41 Espectro de LED 6 – Longitud de onda.....	84
5.42 Espectro de LED 6 – Nivel de señal	85
5.43 Constante de Planck teórica	85
5.44 Constante de Planck media calculada.....	86
5.45 Error absoluto.....	86
5.46 Error relativo	87
5.47 LED con máxima desviación	87
5.48 Reinicio de LEDs	88
5.49 LEDs reiniciados	88

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Elementos semiconductores.....	8
2.2. Valores para el Germanio, el Silicio y el Arsenio de galio	17
2.3. Cálculo de la constante de Planck con diversos LEDs.....	31
2.4. Gráfico de valores de la constante de Planck para diodos LED	31
3.1. Especificaciones del Arduino Mega 2560	35
3.2. Entradas/Salidas utilizadas del Arduino Mega 2560	36
3.3. Longitudes de onda de los LEDs.....	37
3.4. Secuencia de control de un motor PaP Bipolar.....	42
3.5. Conexiones Arduino – Controlador – Motor	43
3.6. Conexión de pantalla LCD	46
3.7. Conexiones del schmitt trigger	49
6.1. Presupuesto del Arduino	90
6.2. Presupuesto del sistema de iluminación LED	90
6.3. Presupuesto del sistema de control mecánico de LEDs	91
6.4. Presupuesto de la pantalla LCD.....	91
6.5. Presupuesto del sistema de interrupciones	91
6.6. Presupuesto del sistema de alimentación	92
6.7. Presupuesto de la miscelánea	92
6.8. Presupuesto TOTAL.....	92

Capítulo I:

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

La realización del presente proyecto fin de carrera ha consistido en el diseño y montaje de un equipo de medida automático, que permite realizar la medida de la constante de Planck utilizando los principios de funcionamiento de los diodos LED.

La realización de este proyecto surge con la necesidad de disponer de un equipo capaz de realizar la medida de la constante de Planck para el laboratorio de Comunicaciones Ópticas del departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones (DIAC). El equipo que se ha diseñado en este proyecto fin de carrera no existe actualmente en el mercado.

El equipo de medida consta de un microprocesador que controla una batería de diodos LED. El microcontrolador ilumina un LED, aumentando su tensión de alimentación desde 0 a 5Vc. Dicho LED está enfrente a una fibra óptica que a su vez está conectada a un analizador de espectros óptico. Cuando el microcontrolador detecta que se alcanza la tensión de encendido del LED, V_0 , se mide esa tensión y la almacena. Mide la tensión de encendido correspondiente a ese LED, el microcontrolador realiza los cálculos necesarios para hallar la constante de Planck, y muestra el resultado por una pantalla LCD. Una vez realizado el cálculo de la constante de Planck, el microprocesador entra en un bucle infinito en el que mantiene la tensión de encendido medida para ese LED de forma constante, así se permite el usuario que observe el espectro del LED en el analizador de espectros ópticos. Cuando el usuario quiere seleccionar un nuevo LED acciona un pulsador que provoca una interrupción al microprocesador, saltando del bucle infinito al proceso automático de selección de LED. Completada la iluminación de la batería de LEDs se procede a comprobar el valor estudiado de la constante de Planck, y se compara con el valor teórico.

Tras simulaciones realizadas con diversos microcontroladores PIC, y debido a la falta de programador para el nivel de PIC requerido (se precisaba un PIC potente porque el programa de simulación era pesado), se optó por la utilización de la placa controladora Arduino MEGA. Esta placa permite la programación de forma cómoda y desde un ordenador personal, permitiendo el desarrollo de un programa pesado gracias a su alta memoria interna. Además, el Arduino MEGA, cuenta con el suficiente número de puertos para poder controlar todos los sistemas periféricos.

Introducción

Para poder realizar la transmisión de luz de cada uno de los LED por la fibra óptica, se precisa de un sistema mecánico que enfrente los LEDs a la fibra. Se barajó la posibilidad de utilizar sistemas circulares, aprovechando el giro del eje del motor, o sistemas lineales, creando una estructura de engranajes. Se optó por un sistema lineal proporcionado por el motor paso a paso (PaP) de un lector de CDs. Este motor paso a paso se controla mediante una placa controladora que protege al Arduino de tensiones de alimentación altas y permite el control de las dos bobinas del motor paso a paso con dos sencillos comandos.

Se decidió utilizar una pantalla LCD de 16 caracteres por 2 líneas para mostrar los resultados. En esta pantalla se muestra la constante de Planck calculada para cada uno de los LEDs, y finalmente la constante de Planck teórica, la media, el error absoluto, el relativo, y el LED que produce mayor desviación. Además, la pantalla muestra en todo momento el proceso realizado en tiempo real por el Arduino MEGA, la iluminación de los LEDs o la colocación de cada LED frente la fibra óptica. Por último informa del proceso de reseteo de la batería de LEDs para volver a enfrentar el LED número uno con la fibra óptica.

Para las interrupciones necesarias para indicar al Arduino cuando salir del bucle infinito de alimentación constante, se diseñó un sistema de interrupciones controladas por un pulsador y un circuito integrado de puertas lógicas que permite una interrupción limpia.

Todo el equipo está comprendido en una sola caja. Ha sido necesario un proceso de mecanizado para la instalación del conector de fibra óptica, la pantalla LCD con el botón de contraste y el LED de encendido, el botón de interrupción y el LED de indicación de interrupción, la rendija de ventilación y las aperturas necesarias para los conectores de alimentación, tanto para el motor y su placa controladora, como para el propio Arduino.

Capítulo II:

Fundamentos del sistema de medida

II. FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE MEDIDA

Para poder comprender el funcionamiento práctico del equipo automático de medida de la constante de Planck, es necesario conocer los principios de funcionamiento de los diodos LED, su composición, estructura, y el principio teórico de la constante de Planck.

II.1. FUNCIONAMIENTO DE DIODOS LED

Un diodo LED (Light Emitting Diode: “diodo emisor de luz”) es un componente optoelectrónico que emite luz.

Cuando un LED se polariza de forma directa (*Ver figura 1.1*), los electrones se recombinan con los huecos del dispositivo, liberando energía en forma de fotones. Este proceso se denomina electroluminiscencia (*Ver II.1.1*), y el color de la luz emitida por el diodo LED viene determinado por la banda prohibida del material semiconductor (*Ver II.4*) del que están hechos los diodos LED.

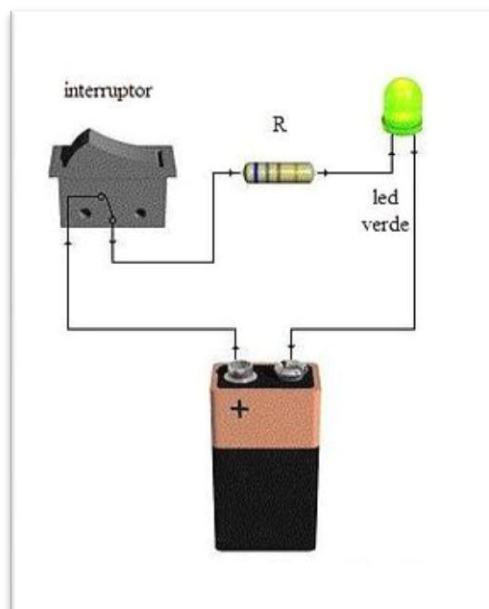


Figura 1.1: Polarización directa de un diodo LED (Figura obtenida de la referencia [5])

La utilización de los LEDs está muy extendida en la actualidad, principalmente para sistemas de control y de iluminación.

Los primeros LEDs fabricados emitían luz roja de baja intensidad, pero actualmente son capaces de emitir luz de alta luminosidad en el espectro infrarrojo, visible y ultravioleta.

Las principales ventajas de los LEDs son un bajo consumo de energía frente a las otras fuentes de luz (incandescente y fluorescente), mayor tiempo de vida, tamaño menor, mayor fiabilidad¹, resistencia de los materiales, reducción de la emisión de calor, no crean campos magnéticos, no contienen mercurio (al contrario de la tecnología fluorescente), tienen mayor índice de producción cromática, reducen ruidos en las líneas eléctricas, son especiales para utilizarse en los sistemas fotovoltaicos y no les afecta el encendido intermitente.

II.1.1. Electroluminiscencia [1]

Se dice que un material o una sustancia es electroluminiscente si emite luz cuando recibe el choque de un haz de electrones.

La electroluminiscencia fue un gran descubrimiento para la emisión de luz mediante materiales de estado sólido². A principios del siglo XX se descubrió que con el carburo de silicio (SiC) era posible la emisión de luz a bajas temperaturas, gran diferencia con la técnica utilizada hasta ese momento para la emisión de luz, la incandescencia, que consistía en la aplicación de una diferencia de potencial a un material de estado sólido que alcanzaba grandes temperaturas (>750 °C).

La creación de este tipo de material se llevaba a cabo en hornos calentados eléctricamente en los cuales el cristal de dióxido de silicio (SiO₂) reaccionaba con el carbono (C) para formar el carburo de silicio (SiC).

El carburo de silicio (SiC), al que se llamó carborúndum, presentaba una alta dureza (muy cercana a la del diamante) y un bajo coste de fabricación, por lo que se posicionó

¹ Según la RAE: probabilidad de buen funcionamiento de algo.

² Un cuerpo sólido se caracteriza porque opone resistencia al cambio de forma y de volumen, sus partículas se encuentran juntas y correctamente ordenadas, y sus moléculas tienen una gran cohesión y adoptan formas bien definidas.

rápida como una buena opción para la fabricación de fuentes de luz con materiales de estado sólido.

II.2. MATERIALES SEMICONDUCTORES [3][8]

Los materiales semiconductores están caracterizados por tener una resistividad eléctrica situada entre 10^{-2} y $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, y por ser materiales que tienen una estructura de bandas (Ver figura 2.1) separadas por una banda prohibida (band-gap – ver punto II.4) para excitaciones eléctricas que se encuentra entre cero y aproximadamente 4 electrón-voltios (eV). Los materiales con banda prohibida cero son metales o semimetales, mientras que aquellos con una diferencia superior a 3 eV son aislantes.

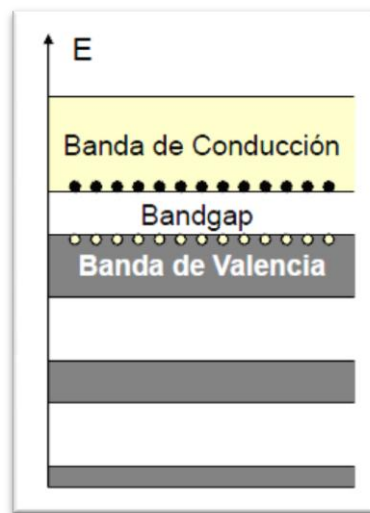


Figura 2.1: Estructura de bandas de un semiconductor (Figura obtenida de la referencia [8])

El semiconductor más utilizado actualmente es el silicio, material que permitió la electroluminiscencia.

Según la tabla periódica de los elementos químicos, que los clasifica, organiza y distribuye conforme a sus propiedades y características, los semiconductores elementales son los que se aprecian en la tabla 1. Estos elementos químicos están agrupados en la tabla periódica según su valencia atómica, es decir, el número de electrones que tienen en su última capa. Dado que las propiedades químicas dependen profundamente de las interacciones de los electrones que están ubicados en los niveles externos (última capa), los elementos de un mismo grupo (mismo número de electrones en la última capa) tienen propiedades químicas similares, y es interesante conocer el número de electrones como se verá en los puntos II.2.3 y II.2.4

Elemento	Grupos	Electrones en la última capa
Cd	12	$2 e^{-}$
Al, Ga, B, In	13	$3 e^{-}$
Si, C, Ge	14	$4 e^{-}$
P, As, Sb	15	$5 e^{-}$
Se, Te	16	$6 e^{-}$

Tabla 2.1: Elementos semiconductores

Los semiconductores aparecen con una gran variedad de estructuras cristalinas con composiciones químicas diferentes. Existen semiconductores elementales como el silicio (Si) o compuestos binarios como el arseniuro de galio (GaAs). También existen compuestos orgánicos que son semiconductores, como el poliacetileno (CH). Además, las combinaciones de los grupos 12 y 13 con los grupos 15 y 16, respectivamente, presentan idéntico comportamiento.

Algunos semiconductores pueden mostrar un comportamiento magnético, y otros se comportan como superconductores cuando son dopados con portadores suficientes.

II.2.1 Semiconductores intrínsecos

Un semiconductor **intrínseco** es aquel que se encuentra en estado puro, es decir, no contiene ninguna impureza (átomos de otro tipo de semiconductor en su estructura).

Cuando se eleva la temperatura de la red cristalina de un elemento semiconductor intrínseco, algunos enlaces covalentes³ se rompen, y varios electrones pertenecientes a la banda de valencia (*Ver punto II.3*) se liberan de la atracción que ejerce el núcleo del átomo sobre dichos electrones. Estos electrones libres saltan a la banda de conducción y se comportan como electrones de conducción, pudiendo desplazarse libremente de un átomo a otro dentro de la propia estructura cristalina.

³ Un enlace covalente se produce entre dos átomos o grupos de átomos cuando se comparten electrones del último nivel para estabilizar la unión entre dichos átomos.

II.2.2 Semiconductores extrínsecos

Para que un semiconductor permita el paso de una corriente eléctrica es necesario introducir a su estructura molecular cierta alteración mediante pequeñas cantidades de átomos de otros elementos o “impurezas”. En ese momento el semiconductor original se convierte en un semiconductor **extrínseco**. Cuando el semiconductor cuenta en su estructura cristalina con impurezas es capaz de conducir corriente eléctrica.

II.2.3. Semiconductores tipo P

Un semiconductor **tipo P** se obtiene realizando un proceso de dopado⁴, en el cual se le añaden átomos de un material dopante (**material aceptor** – Ver figura 2.2) al semiconductor intrínseco que permiten aumentar el número de portadores de cargas libres (En este caso positivos: huecos).

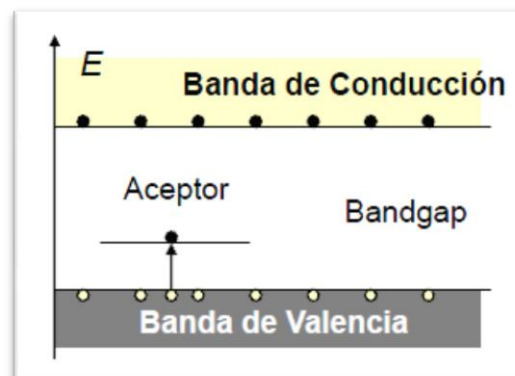


Figura 2.2: Aceptación de un semiconductor tipo P (Figura obtenida de la referencia [8])

Cuando se añade el material dopante, se liberan los electrones de la capa más externa del semiconductor que tiene una vinculación más débil a los átomos del semiconductor, consiguiéndose huecos donde antes había electrones. De esta forma se consigue un material con abundancia de huecos.

Para el silicio, que está formado por átomos con cuatro electrones en su capa más externa, se le une átomos con tres electrones de valencia (cualquiera del grupo 13), creándose tres enlaces covalentes y un hueco que podrá aceptar un electrón libre.

⁴ En la producción de semiconductores se denomina dopado al proceso intencional de agregar impurezas a un semiconductor extremadamente puro (intrínseco) con el fin de cambiar sus propiedades eléctricas.

Por ejemplo, uniendo átomos de silicio con un átomo de boro. (Ver figura 2.3)

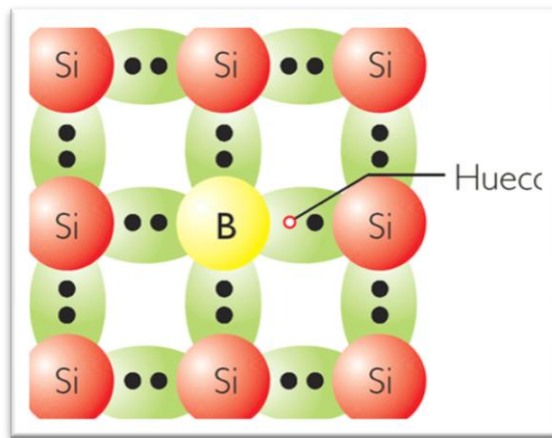


Figura 2.3: Semiconductor tipo P

II.2.4. Semiconductores tipo N

Un semiconductor **tipo N** se obtiene realizando un proceso de dopado, en el cual se le añaden átomos de un material dopante (**material donante** – Ver figura 2.4) al semiconductor intrínseco que permiten aumentar el número de portadores de cargas libres (En este caso negativos: electrones).

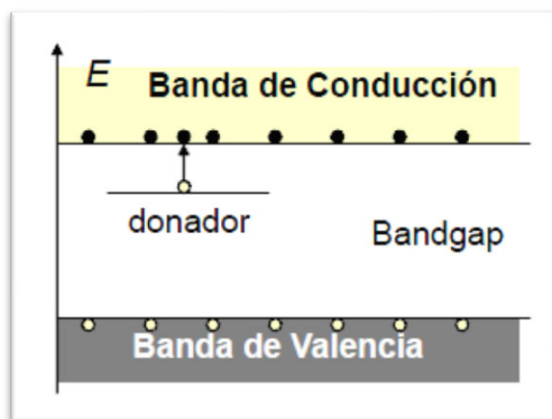


Figura 2.4: Donación en semiconductor tipo N (Figura obtenida de la referencia [8])

Cuando se añade el material dopante, se unen sus electrones de vinculación más débil, los de la capa externa, a los átomos del semiconductor, consiguiéndose electrones libres. De esta forma se consigue un material con abundancia de electrones.

Para el silicio, que está formado por átomos con cuatro electrones en su capa más externa, se le une átomos con cinco electrones de valencia (cualquiera del grupo 15), creándose tres enlaces covalentes y un hueco que podrá aceptar un electrón libre.

Por ejemplo, uniendo átomos de silicio con un átomo de fósforo. (*Ver figura 2.5*)

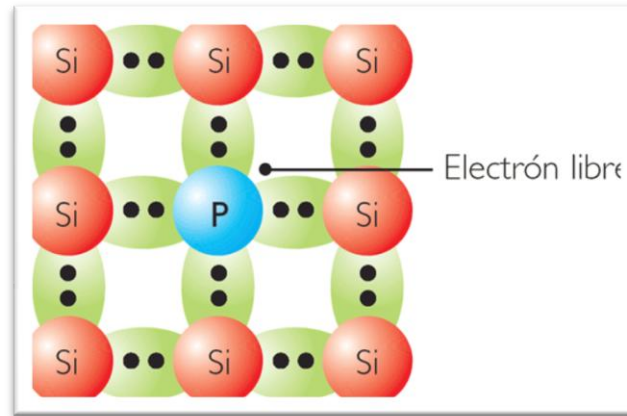


Figura 2.5: Semiconductor tipo N

II.3. ESTRUCTURA DE BANDAS

En la física de estado sólido se describe la estructura electrónica de un material como una estructura que se divide en bandas electrónicas o bandas de energía.

En los sólidos, al contrario que en los átomos aislados, sus átomos están cercanos entre sí. Cuando éstos se aproximan, los niveles de energía de cada átomo se ven influenciados por los otros átomos, de tal manera que el nivel de energía de cada átomo en particular se dividirá en niveles, formando una banda.

La banda de valencia contiene los electrones que se encuentran en la última capa de los átomos, además, en los semiconductores se encuentra totalmente llena de electrones. La banda de conducción contiene los electrones libres que se han desligado de sus átomos y pueden moverse libremente. Estos electrones son lo que permiten conducir corriente eléctrica. El espacio energético entre bandas de energía se denomina banda prohibida (*Ver punto II.4*).

La mayor característica que diferencia entre conductores, aislantes y semiconductores es la estructura de sus bandas de energía (*Ver figura 2.6*). En los conductores (como los metales), la banda de valencia se superpone con la banda de conducción. En los aislantes, los electrones de su banda de valencia están separados por una banda prohibida grande. Finalmente, en los semiconductores, existe una banda prohibida suficientemente pequeña entre las bandas de valencia y conducción que hace que los electrones puedan saltarla por calor u otro tipo de excitación.

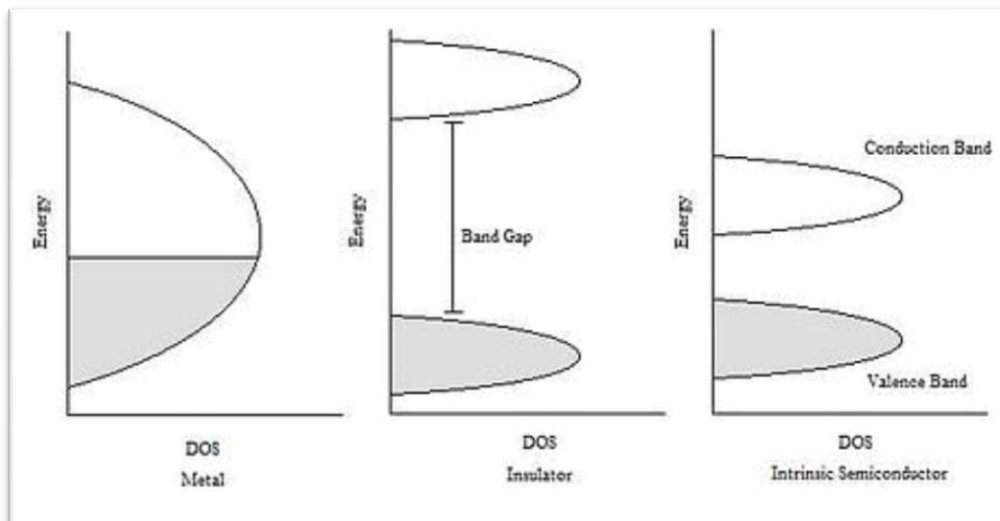


Figura 2.6: Estructura de bandas para metales, aislantes y semiconductores

La estructura de bandas depende de la energía del electrón y de la densidad de estados (Density of states – DOS – *Ver punto II.3.3*).

II.3.1 Nivel de Fermi

El nivel de Fermi es el término utilizado para describir la parte superior del conjunto de niveles de energía de los electrones a la temperatura de cero absoluto. En el cero absoluto, los electrones se encuentran en el nivel de energía más bajo de los disponibles en los estados de energía de los electrones. Estos electrones constituyen lo que se llama “mar de Fermi”. El nivel de Fermi es la superficie de ese “mar”, donde no hay electrones que tengan la suficiente energía para elevarse por encima de esa superficie.

El concepto de la energía de Fermi es muy importante a la hora de comprender las propiedades eléctricas y térmicas de los sólidos.

El nivel de Fermi es fundamental en la estructura de bandas de los sólidos. En los semiconductores dopados tipo n y tipo p, el nivel de Fermi se desplaza por las impurezas (Ver figura 2.7).

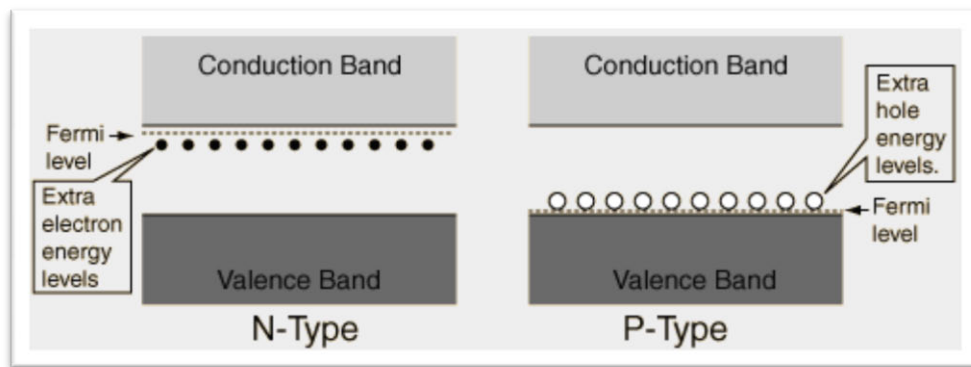


Figura 2.7: Niveles de Fermi en semiconductores tipo N y tipo P

En los materiales tipo n, los niveles de energía se encuentran cerca de la parte superior de la banda prohibida, de modo que pueden ser fácilmente excitados hacia la banda de conducción. En los materiales de tipo p, los huecos extras de la banda prohibida, permiten la excitación de los electrones de la banda de valencia, dejando huecos móviles en la banda de valencia.

II.3.2. Función de Fermi

La función de Fermi $f(E)$ permite hallar la probabilidad de que sean ocupados determinados estados de energía de electrones disponibles, a una temperatura dada.

La función de fermi es la siguiente:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_f)/kT} + 1}$$

La función indica que a temperaturas ordinarias, la mayoría de los niveles por debajo del nivel de Fermi están llenos, existiendo relativamente pocos electrones con energías por encima del nivel de Fermi.

Según la teoría de estructura de bandas de energía para los sólidos, se puede apreciar la implicación de la función de Fermi en la conductividad eléctrica de un semiconductor. A temperaturas altas, un mayor número de electrones pasan de la banda de valencia a la de conducción participando en la conducción eléctrica. (Ver figura 2.8)

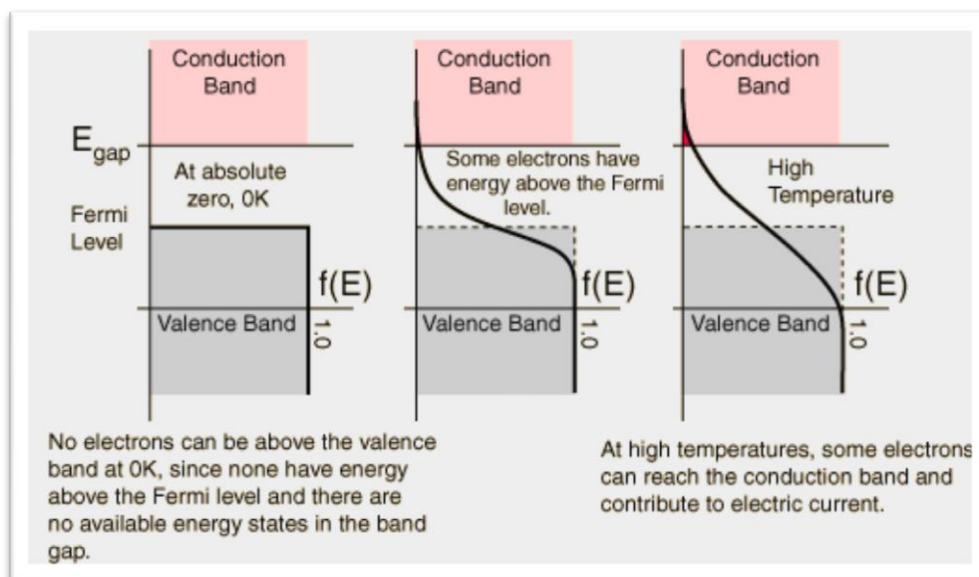


Figura 2.8: Función de Fermi

En la banda de conducción a 0 °K no hay electrones aunque existan un gran número de estados disponibles, debido a que la función de Fermi es cero. A altas temperaturas, la densidad de estados y la función de Fermi tienen valores finitos en la banda de conducción, por lo que hay una población de electrones conductores activa.

II.3.3. Densidad de Estados de Energía (DOS)

La distribución de energía entre las partículas, depende de cuantos estados hay disponibles en un intervalo de energía dado, y el número de estados de energía disponibles determina la cantidad de electrones que alcanzan la banda de conducción. Teniendo en cuenta la función de distribución de Fermi vista anteriormente, es posible calcular el número de electrones que alcanza la banda de conducción. (Ver figura 2.9)

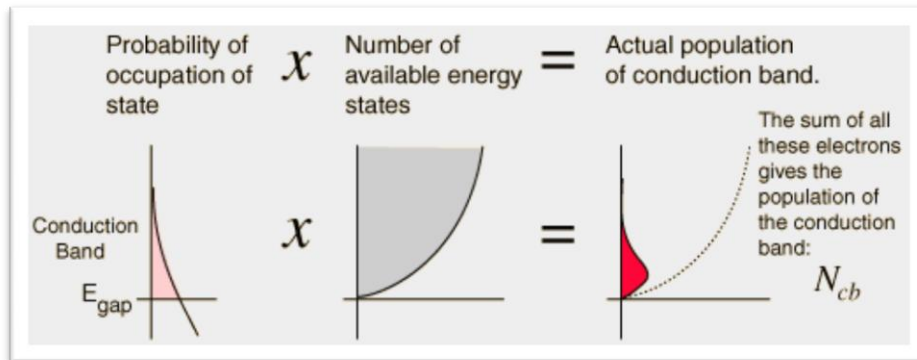


Figura 2.9: Población de electrones en la banda de conducción

De esta forma, solo los electrones con energías próximas a la de Fermi tienen la probabilidad de pasar a estados de energía superior.

En resumen, el producto de la función de densidad por la función de distribución de Fermi proporciona el número de electrones por unidad de energía.

II.4. BANDA PROHIBIDA (BAND-GAP)

La propiedad que distingue a los semiconductores del resto de los materiales es el comportamiento de sus electrones, en particular la existencia de las bandas prohibidas (band-gap). Estas band-gap son brechas de energía, lagunas, que aparecen en los espectros de excitación electrónica de los semiconductores. El rango de energía que las caracteriza se refiere a la diferencia de energía (en electrón-voltios) entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción. (Ver figura 2.10)

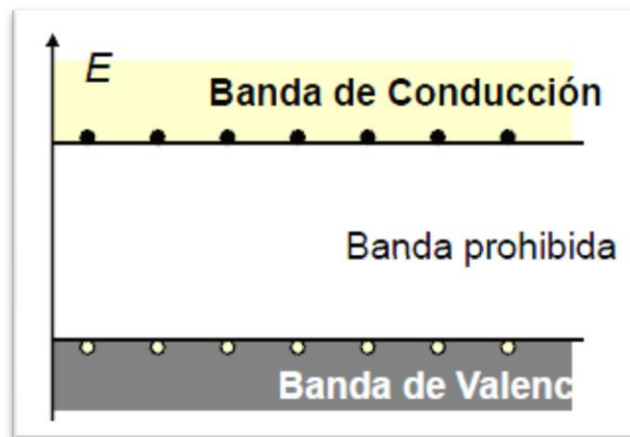


Figura 2.10: Estructura de la banda semiconductor (Figura obtenida de la referencia [8])

Esto es equivalente a la energía necesaria para liberar un electrón de una de las capas que orbitan alrededor del núcleo, y que se convierta en un portador de carga móvil, capaz de moverse libremente dentro del material sólido, por lo que el intervalo de banda es un factor importante que determina la conductividad eléctrica de un sólido. Los electrones pueden conseguir la energía suficiente para saltar de la banda de valencia a la banda de conducción mediante la absorción de calor (fonón) o de luz (fotón).

La energía de la band-gap en los semiconductores disminuye al aumentar la temperatura. Cuando la temperatura aumenta, la amplitud de las vibraciones atómicas se incrementa, aumentando la separación interatómica. Un aumento de la separación interatómica disminuye el potencial visto por los electrones en el material, que a su vez reduce el tamaño de la energía de la band-gap. La relación entre la band-gap y la temperatura se puede describir mediante la ecuación empírica de Varshni:

$$Eg(T) = Eg(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

Donde $E_g(0)$ es la energía a temperatura 0°K; α y β son parámetros de los materiales.

Los valores para el Germanio, el Silicio y el Arsenio de galio, son los siguientes:

	Germanio	Silicio	GaAs
$E_g(0)$ [eV]	0.7437	1.166	1.519
α [eV/k]	4.77×10^{-4}	4.73×10^{-4}	5.41×10^{-4}
β [K]	235	636	204

Tabla 2.2: Valores para el Germanio, el Silicio y el Arsenio de galio

La relación entre la energía de la band-gap y la temperatura puede apreciarse en la siguiente figura:

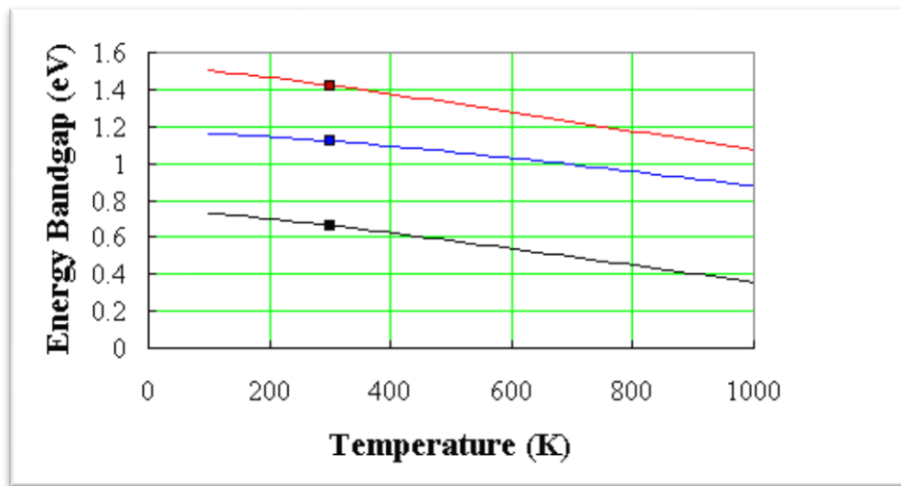


Figura 2.11: Relación entre la energía de la band-gap (eV) y la temperatura (K).

II.4.1. Semiconductores de GAP directo y GAP indirecto

En física de semiconductores, la estructura electrónica de este tipo de materiales determina la forma de sus bandas de energía, diferenciando entre los semiconductores de GAP directo y de GAP indirecto.

Para poder entender la diferencia entre ambos tipos de bandas de energía se debe conocer el término “momento lineal” (momentum): Dicho término se refiere al movimiento de un cuerpo en cualquier teoría mecánica. En mecánica clásica se define como el producto de la masa del cuerpo y su velocidad en un instante determinado.

$$p = m * v$$

Se considera GAP directo cuando el momento lineal del electrón y del hueco que va a ocupar dicho electrón es el mismo, tanto para la banda de valencia como para la banda de conducción respectivamente, y así el electrón puede emitir un fotón “directamente” porque el fotón no tiene casi momento. (Ver figura 2.12)

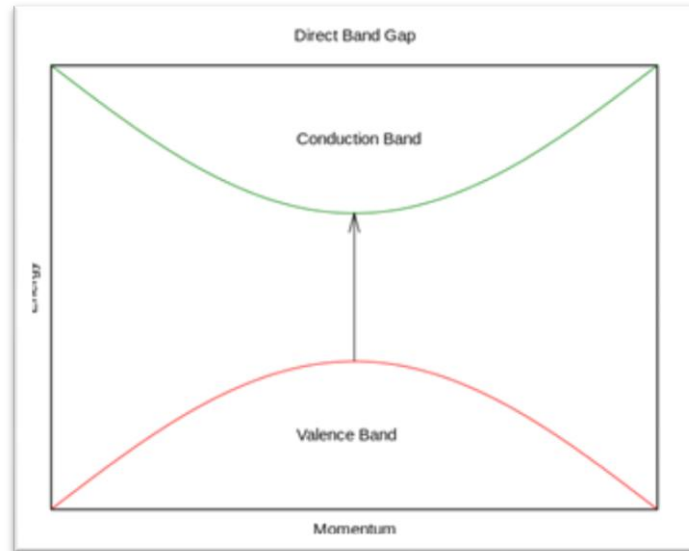


Figura 2.12: Transmisión de electrón en GAP directo (Figura obtenida de la referencia [5])

Se considera GAP indirecto cuando el momento lineal no es el mismo, y el fotón no puede ser emitido directamente, debido a que el electrón debe pasar a través de un estado intermedio. (Ver figura 2.13)

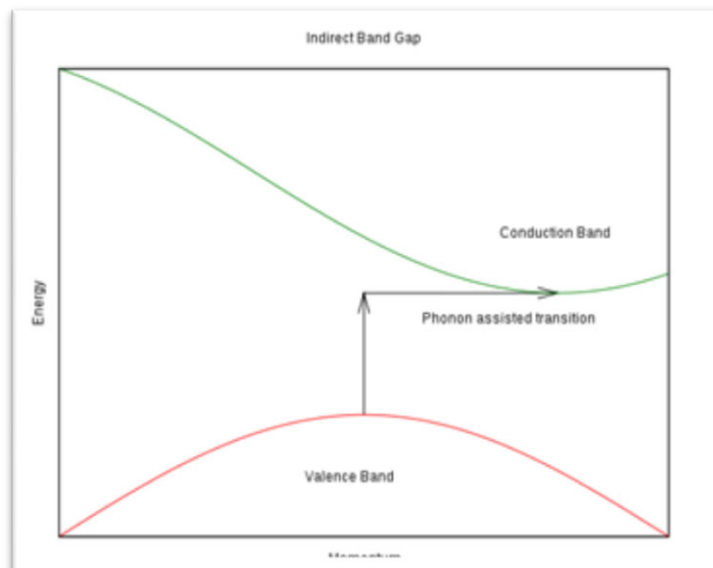


Figura 2.13: Transmisión de electrón en GAP indirecto (Figura obtenida de la referencia [5])

Por lo que para poder pasar de una banda a otra necesita ser asistido por un fonón con un impulso igual a la diferencia de momento lineal entre el electrón y el agujero.

II.4.2. Recombinación radiativa

Para la emisión de luz por parte de un semiconductor se precisa un proceso denominado recombinación radiativa. Debido a que un fotón con una energía cercana a la de la band-gap del semiconductor tiene momento lineal casi cero, es necesario que un electrón en la banda de conducción elimine un agujero en la banda de conducción, liberando el exceso de energía en forma de fotón, dando lugar a una recombinación radiativa.

El proceso de recombinación es posible en un GAP directo, ya que el momento lineal será el mismo para el hueco que para el electrón. Para un GAP indirecto no será posible a menos que el proceso implique la absorción o emisión de un fonón (partícula de calor), donde el impulso de fonones es igual a la diferencia entre el electrón y el impulso agujero (Se puede también utilizar un defecto cristalográfico⁵, que lleva a cabo esencialmente el mismo papel). La participación del fonón hace que este proceso sea mucho menos probable que ocurra en un lapso de tiempo pequeño, que es la razón por la que la recombinación radiativa es mucho más lenta en GAP indirectos que en GAP directo. Esta es la razón por la que los LEDs y los diodos láser son mayoritariamente fabricados con materiales de GAP directo, y no materiales de GAP indirecto, como el silicio.

Debido a que las recombinaciones radiativas es un proceso lento en materiales de GAP indirecto, en la mayoría de los casos, la recombinación radiativa será una proporción pequeña del total de recombinaciones, con la mayoría de las recombinaciones siendo no radiativas, dando lugar a defectos. Sin embargo, si a los electrones excitados se les impide llegar a estos lugares de recombinación, no tienen más remedio que terminar cayendo en la banda de valencia por recombinación radiativa. Esto se puede forzar mediante la creación de un bucle de dislocación en el material (*Ver figura 2.14*).

⁵ Un defecto cristalográfico es cualquier perturbación en la periodicidad de la red de un sólido cristalino.

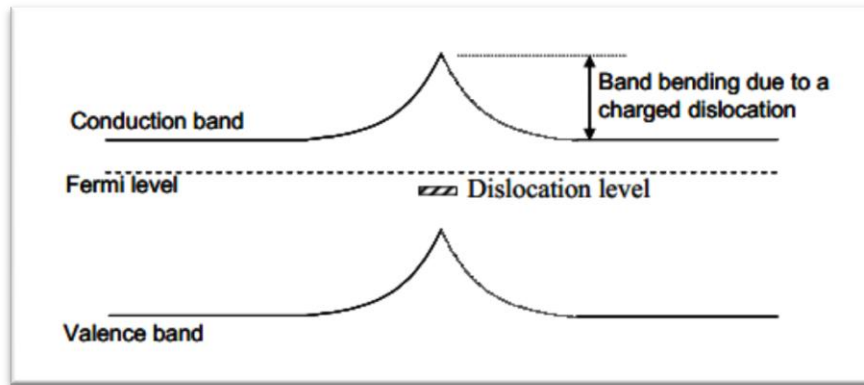


Figura 2.14: Recombinación radiativa

En el borde del bucle, los planos por encima y por debajo del "disco de dislocación" se separan, creando una presión negativa, que eleva la energía de la banda de conducción sustancialmente, con el resultado de que los electrones no pueden pasar a este borde. Debido a que la zona directamente por encima del lazo de dislocación está libre de defectos, los electrones van a volver a caer en la capa de valencia por recombinación radiativa, emitiendo así la luz. Este es el principio en que se basa los "DELEDs" (luxación Engineered LEDs).

II.5. ESTRUCTURA DE DIODOS LED SEMICONDUCTORES [1]

Como se ha visto anteriormente, cuando un electrón pasa de la banda de valencia a la banda de conducción se produce una pérdida de energía en forma de luz. Los diodos LED están constituidos por dos partes formadas por materiales semiconductores dopados. Una parte, está formada por un semiconductor tipo p dopado con huecos, y la otra parte por un semiconductor tipo n dopado con electrones.

Inicialmente, la zona de tipo p y la zona de tipo n se encuentran separadas. Cuando se unen, la diferencia de concentración de portadores a uno y otro lado hace que se produzca un flujo de huecos libres a la zona N y un flujo de electrones libres a la zona P. (Ver figura 2.15)

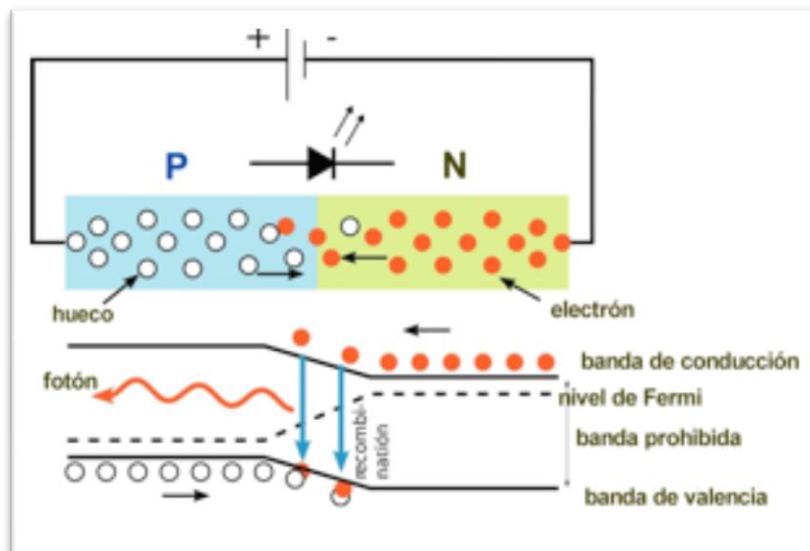


Figura 2.15: Unión P-N de un semiconductor (Figura obtenida de la referencia [5])

Después de cruzar la unión, los electrones y huecos se recombinan en el lado opuesto, creando una región de carga espacial en el medio, también llamada **región de agotamiento**, debido a la no existencia de cargas libres en esa zona intermedia. En ese instante, en la zona P se encuentra una mayor concentración de electrones, y en la zona N una mayor concentración de huecos, que produce la creación de una diferencia de potencial, y su campo eléctrico asociado, E , entre uno y otro lado. La creación de este campo eléctrico produce una corriente de desplazamiento que se opone al movimiento de difusión de las cargas como si fuese una barrera, terminando por detenerlas.

Una vez alcanzado el equilibrio, los electrones y los huecos quedan confinados en las regiones P y N separados por la barrera causada por el campo eléctrico.

Cuando se aplica un voltaje externo, V , polarizado en directa (tensión positiva aplicada en el lado P y negativa en el lado N) se rompe la situación de equilibrio en la unión p-n. De esta forma, tanto los huecos del lado P como los electrones de la zona N adquieren mayor energía potencial, por lo que se reduce la altura de la barrera, y al mismo tiempo la anchura de la zona de agotamiento. Con todo ello, se da lugar a que una mayor fracción de electrones y de huecos pueda pasar al otro lado por difusión, mientras que el movimiento de desplazamiento debido al campo eléctrico E que se opone a la difusión, queda prácticamente inalterado y no puede frenar la difusión de cargas con una nueva mayor energía.

Este campo eléctrico es equivalente a una diferencia de potencial (V_0) entre las zonas P y N, de un valor de 0,7v en el caso del Silicio.

II.5.1. Heteroestructuras [1]

Para la creación de diodos LED de alta intensidad lumínica se dejó de utilizar las homouniones vistas anteriormente y se pasó a utilizar un nuevo tipo de unión: Las heterouniones.

Se trataba de limitar los tamaños de las zonas de recombinación radiativa, y así aumentar la eficiencia⁶, mediante la utilización de barreras que delimitara el tamaño de la zona de recombinación radiativa.

Si una estructura consta de dos barreras, es decir, un semiconductor con dos band-gap de gran tamaño, a este tipo de estructuras se le denomina heteroestructura doble (DH).

En las Heteroestructuras dobles se inyectan portadores en la región activa que se confinan por medio de las dos barreras. Debido a ello, el espesor de la región en la que se recombinan los portadores se limita por la zona activa, y no por la anchura de la zona de agotamiento. (Ver figura 2.16)

⁶ En física, se define la eficiencia para un proceso o dispositivo como la relación entre la energía útil y la energía invertida.

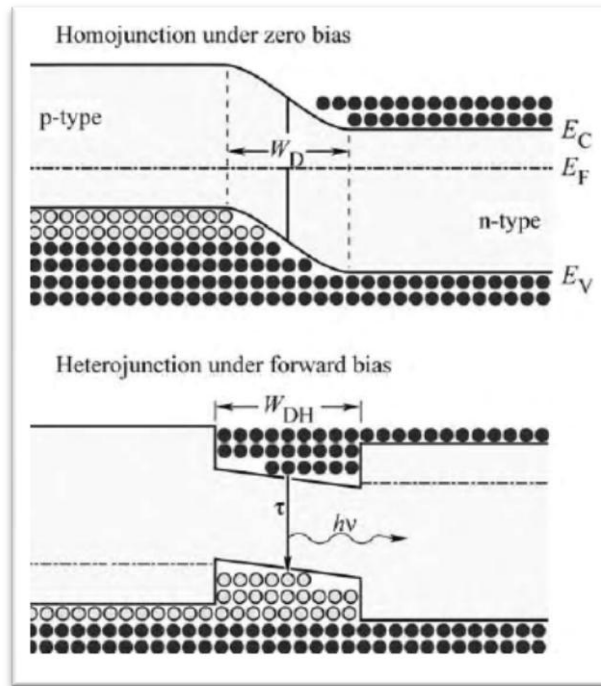


Figura 2.16: Homounión y heterounión (Figura obtenida de la referencia [1])

El cambio es sustancial, ya que se pasa de un espesor de zona de agotamiento de 1 a 20 micras, a una región activa que oscila entre 0,01 y 1 micra.

Gracias a ello se consigue que los portadores en la región activa de una heteroestructura tenga una concentración mucho más alta de portadores que una homoeestructura, y por lo tanto, se aumenta la tasa de recombinación radiativa y se reduce el tiempo que se tarda en recombinar todas las partículas, aumentando así su eficiencia. De esta forma se disminuye la corriente de polarización necesaria aumentando el valor de la tasa de recombinación.

El empleo de Heteroestructuras permite la mejora de la eficiencia de los diodos LED mediante el confinamiento de los portadores en la región activa, evitando la difusión de los portadores minoritarios a través de largas distancias.

Gracias a que las Heteroestructuras se utilizan para conseguir confinar la luz en las regiones de las guía de ondas, su uso está muy extendido a la hora de utilizar las Heteroestructuras en la creación de LEDs y láseres.

El mayor inconveniente que presentan las Heteroestructuras es la resistencia causada por el interfaz de la heteroestructura.

Los portadores en el material de menor band-gap se moverán a la de mayor band-gap en el que están los estados de menor energía. (Ver figura 2.17)

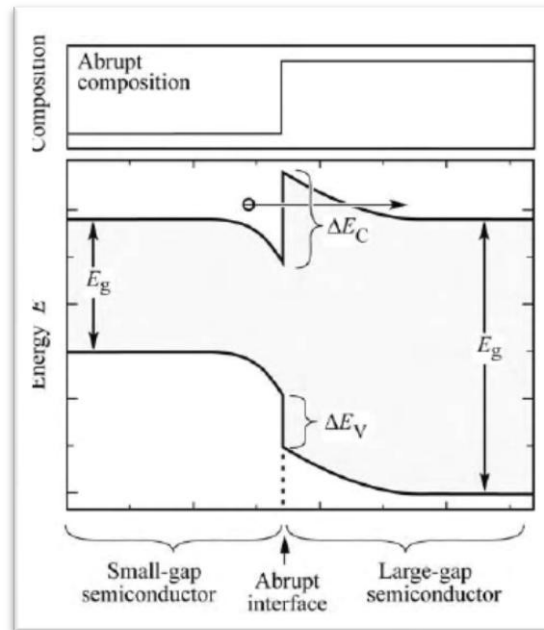


Figura 2.17: Heteroestructura abrupta (Figura obtenida de la referencia [1])

Debido a la resistencia presentada por el interfaz de la heteroestructura (abrupt interface) se produce un fuerte efecto perjudicial en el rendimiento del dispositivo. La energía térmica producida por la resistencia calienta la región activa, disminuyendo así la eficiencia radiativa, como se vio en el punto II.4

El modo de solucionar por completo esta resistencia, se ha presentado como una modificación de la composición química del semiconductor en las proximidades de la heteroestructura, quedando una banda de conducción gradual. (Ver figura 2.18)

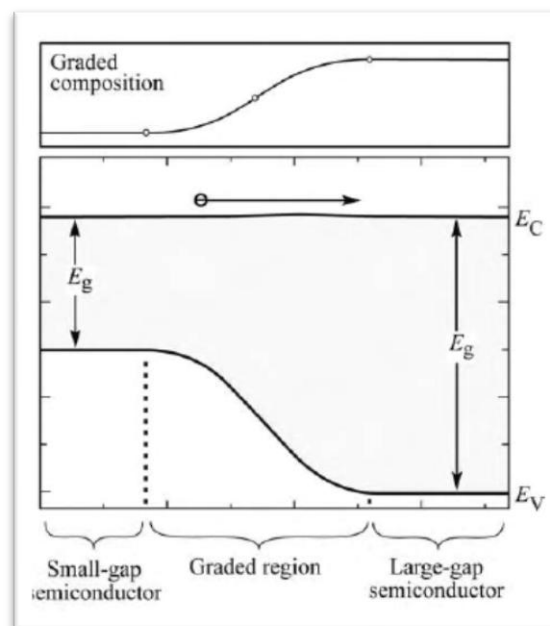


Figura 2.18: Heteroestructura graduada (Figura obtenida de la referencia [1])

Gracias a que ya no se presenta un aumento abrupto de la banda de conducción que obstaculice el flujo de electrones, sino que es una zona parabólica, se ha podido demostrar que la resistencia de una heteroestructura gradual parabólica es comparable a la resistencia de los materiales originales. Por lo tanto, la resistencia adicional introducida por las heteroestructuras abruptas puede ser completamente eliminada por una graduación parabólica.

En un LED ideal, los portadores inyectados se confinan junto a la región activa mediante las capas de barrera, dando como resultado la alta recombinación radiativa requerida.

Las barreras de energía que confinan los portadores en la región activa son, típicamente, del orden de varios cientos de milielectronvoltios (meV). Sin embargo, algunas cargas consiguen escapar de las barreras de la región activa debido a que algunos portadores tienen una energía mayor que la altura de la barrera de confinamiento. (Ver figura 2.19)

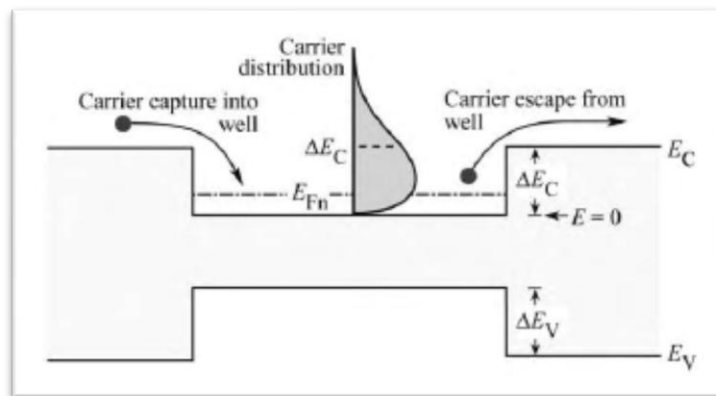


Figura 2.19: Escape de portadores en heteroestructuras dobles (Figura obtenida de la referencia [1])

Por lo tanto, la barrera debe ser alta para reducir al máximo la fuga de portadores.

Algunos materiales como el Nitruro de galio-aluminio (AlGaIn) o el Arseniuro de galio-aluminio (AlGaAs) tienen barreras relativamente altas, y fugas, por lo tanto, pequeñas. Otros materiales como el Fosfuro de aluminio-galio-indio (AlGaInP) tienen menores barreras y muchas fugas.

Además, como se vio en el apartado II.4, la energía de las bandas de los semiconductores disminuye con la temperatura, por lo tanto, como pasaba con la

band-gap, la temperatura reduce la eficiencia de radiación de los LED. Para reducir la dependencia de la temperatura a la hora de emitir luz, se precisan barreras altas.

El desbordamiento de los portadores de la región activa en las regiones de confinamiento es otro problema de las heteroestructuras dobles.

A medida que la concentración de portadores aumenta con la inyección de corriente en la región activa, va aumentando la energía de los portadores hasta alcanzar la barrera, produciéndose desbordamiento de portadores, incluso si la barrera es suficientemente alta. Por lo que si la densidad de portadores es baja, la inyección de corriente se puede descuidar.

Generalmente, el problema del desbordamiento de portadores es más grave en estructuras con regiones activas muy pequeñas, por lo que los LED de alta corriente deben emplear grandes regiones activas en sus heteroestructuras dobles.

II.5.2. Confinamiento de electrones

El confinamiento de los electrones aparece cuando se les restringe el movimiento a una región muy pequeña del espacio. Cuando esta región es tan pequeña que es comparable a la longitud de onda asociada al electrón, entonces comienza a observarse lo que se denomina “comportamiento cuántico”. En estos sistemas, la física no se explica con conceptos clásicos, sino con las propiedades de la Mecánica Cuántica.

Durante la segunda década del Siglo XX, mientras los experimentos se iban realizando en sistemas cada vez más pequeños, aparecieron comportamientos que no eran explicables usando las ideas de la Mecánica Clásica. Algunos experimentos indicaban que la luz o los electrones, se comportan como partículas, y otros indicaban que tenían un comportamiento ondulatorio. Entonces se decidió, que tanto la luz como la materia no se comportaban ni como onda ni como partícula, y que necesitaban una teoría completamente diferente. De esta forma surgió la que es la base del funcionamiento de la electrónica moderna, la Mecánica Cuántica.

Una de las principales características de la Mecánica Cuántica es asociar una partícula, por ejemplo el electrón, con una función de onda.

Para el confinamiento de los electrones surge la idea de **pozo cuántico** (quantum well). En un pozo cuántico, los electrones se confinan en una sola dirección (por ejemplo, X), mientras que en las otras dos (Y, Z) se mueven libremente.

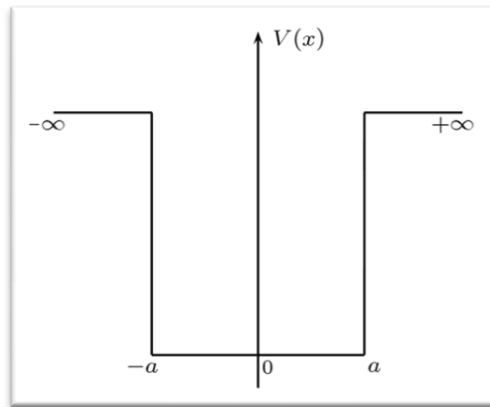


Figura 2.20: Esquema de pozo cuántico

Para explicar la idea de pozo cuántico se utilizara el símil del sándwich de queso. En un pozo cuántico se obliga a los electrones a moverse en el “queso” del sándwich.

Mientras los estados electrónicos cuyo movimiento es perpendicular al “queso” son discretos, los estados electrónicos de movimiento paralelos al “pan” son continuos y presentan un comportamiento semiclásico.

Estos dispositivos están hechos de materiales semiconductores, aunque se han logrado con capas metálicas muy finas. En la siguiente figura se muestra un pozo cuántico formado por un “queso” de Arseniuro de Galio (GaAs) con “panes” de Arseniuro de galio-aluminio (AlGaAs) que tienen una band-gap más amplia.

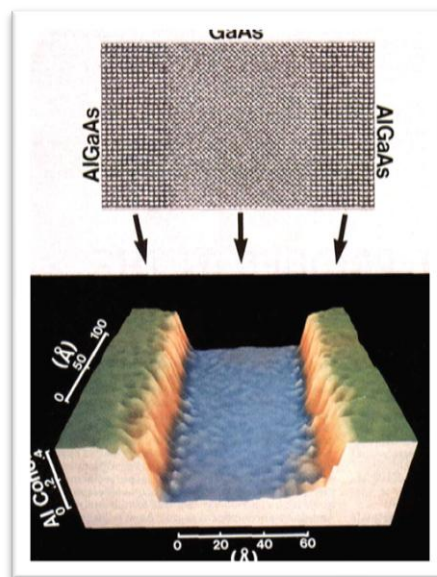


Figura 2.21: Pozo cuántico visto con un microscopio de transmisión

Debido a su naturaleza casi bidimensional, los electrones dentro de un pozo cuántico poseen una densidad de estados de energía (DOS) más pronunciada que en el cuerpo de un material. Además, se cambia la masa efectiva de los agujeros en la banda de conducción para que coincida más estrechamente con la de los electrones de la banda de valencia. Debido a esto, los pozos cuánticos son utilizados de manera abundante en la fabricación de fuentes LED, punteros láser, diodos láseres para lectores de DVDs, lectores de Blu-ray o láseres infrarrojos para comunicaciones por fibra óptica,.

II.6. LA CONSTANTE DE PLANCK [5]

Max Planck fue un físico alemán considerado el fundador de la teoría cuántica, que fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 1918.

La constante que lleva su nombre, desempeña un papel muy importante en la teoría de la mecánica cuántica. Se denota como h , y se define como: “El cuanto elemental de acción”.

En un principio se propuso como la constante de proporcionalidad entre la energía de un fotón, E , y la frecuencia de su onda electromagnética asociada, f . Esta relación entre la energía y la frecuencia se denomina “relación de Planck”:

$$E = h * f$$

Dado que la frecuencia de una onda, depende de la longitud de onda, λ , y de la velocidad de la luz, c , la relación de Planck puede expresarse como:

$$E = \frac{h * c}{\lambda}$$

La constante de Planck tiene su origen en un proyecto que estudiaba “la ley de distribución de energía del espectro normal”. En este proyecto se estudiaba la radiación térmica emitida por un cuerpo debido a su temperatura. En esta teoría se introdujo en 1862 el concepto de cuerpo negro, elemento cuya superficie absorbe toda la radiación térmica que incide sobre él, y que además emite la radiación térmica con el mismo espectro y a la misma temperatura.

Cuando se calculó la energía absorbida por un cuerpo negro a una temperatura dada, se descubrió que en vez de tener una densidad de energía finita y que tendía a cero para altas frecuencias, la densidad medida para el cuerpo negro tendía a infinito a medida que la frecuencia crecía. A este comportamiento se le llamó “catástrofe ultravioleta”.

Planck decidió considerar la energía absorbida y emitida por el cuerpo negro en forma de “paquetes” discretos. Al realizar los cálculos de esta forma obtuvo unos resultados bastante parejos a los resultados teóricos, introduciendo una constante h , posteriormente conocida como la constante de Planck.

El descubrimiento de Planck supuso el comiendo de la mecánica cuántica, que causó un revolución en la forma de entender los fenómenos de la naturaleza a escala atómica.

Planck adelantó la idea de establecer las unidades empleadas en física a partir de las constantes universales.

Las primeras mediciones de la constante h se efectuaron con el efecto Fotoeléctrico, y durante varias décadas se fueron mejorando nuevos métodos que permitieron descubrir nuevos fenómenos físicos afectados por la contante de Planck.

Actualmente, el COTADA de 2010 (El comité de datos para la ciencia y la tecnología - Committee on Data for Science and Technology) recomienda utilizar el valor de:

$$h = 6, 626\ 069\ 57 \times 10^{-34} J * s = 4, 135\ 667\ 51 \times 10^{-15} eV * s$$

Sin utilizar los métodos de refinamiento de medida como el Hall cuántico y el efecto Josepshon, es posible, de forma más básica, medir la contante de Planck en un laboratorio universitario, a través del efecto fotoeléctrico con diodos LED.

Sabiendo la relación entre la energía de un fotón, E , la carga del electrón, e , y la tensión de alimentación del LED para emisión de máxima luz, V :

$$E = e * V$$

Se puede calcular la constante de Planck para cada tipo de LED conociendo su longitud de onda, λ , siendo C la velocidad de la luz:

$$h = \frac{E * \lambda}{c}$$

Siendo:

$$e = 1, 602\ 17 \times 10^{-19} C$$

$$c = 3 \times 10^8 m * s^{-1}$$

El cálculo de la constante de Planck para diversos tipos de LED, es el siguiente:

Color	Long. Onda λ (nm)	Tensión de máxima luz (V)	$E = e * V$ (J)	"h" (J * s)
Violeta	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < V < 4$	$4,48 * 10^{-19}$	$6,3466 * 10^{-34}$
Azul	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < V < 3,7$	$3,97 * 10^{-19}$	$6,2858 * 10^{-34}$
Verde	$500 < \lambda < 570$	$1,9 < V < 4$	$3,77 * 10^{-19}$	$6,5512 * 10^{-34}$
Amarillo	$570 < \lambda < 590$	$2,10 < V < 2,18$	$3,49 * 10^{-19}$	$6,7525 * 10^{-34}$
Naranja	$590 < \lambda < 610$	$2,03 < V < 2,10$	$3,36 * 10^{-19}$	$6,7290 * 10^{-34}$
Rojo	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < V < 2,03$	$2,93 * 10^{-19}$	$6,6945 * 10^{-34}$
Infrarrojo	$\lambda > 760$	$1,63 <$	$2,61 * 10^{-19}$	$6,6158 * 10^{-34}$

Tabla 2.3: Cálculo de la contante de Planck con diversos LEDs

NOTA: Los valores de longitud de onda (λ) son los estipulados por el catálogo Lumiled de la empresa Philips para sus componentes LED para 2012 [7], y los valores de Tensión de luz de encendido, son los estipulados para cada color y tipo de LED. Los valores de Energía y constante de Planck han sido calculados por mí.

La contante de Planck media es: $h = 6,56791 \times 10^{-34} \text{ J} * \text{s}$, siendo un valor muy ajustado a la constante de Planck teórica $h = 6,62606957 \times 10^{-34} \text{ J} * \text{s}$.

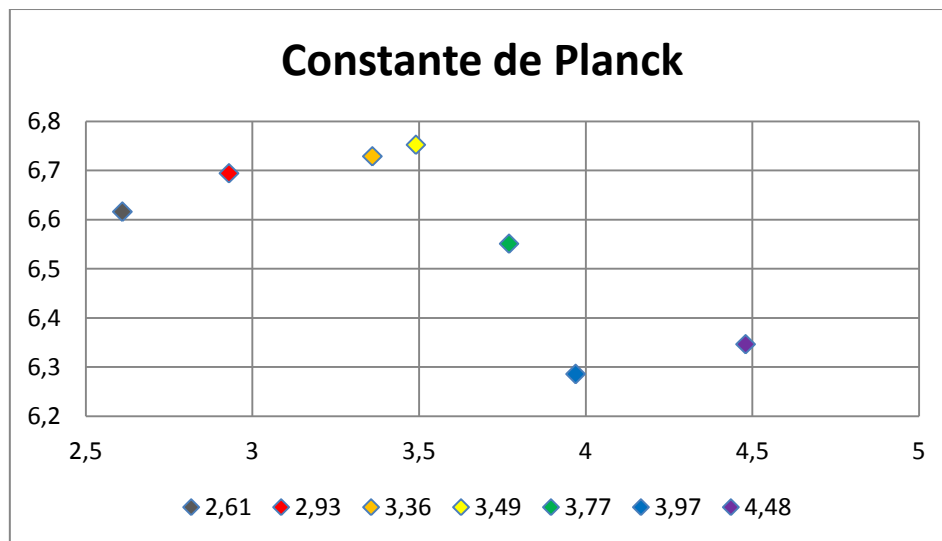


Tabla 2.4: Gráfico de valores de la constante de Planck para diodos LED

Capítulo III:

Descripción del sistema

III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Conocidos los fundamentos teóricos en los que se basa el equipo de medida, a continuación se hablará de los distintos sistemas físicos que lo componen.

III.1. DIAGRAMA DE BLOQUES

El equipo de medida automático de la constante de Planck construido en este proyecto fin de carrera está compuesto por seis grandes bloques: (Ver figura 3.1):

Arduino, Sistema de iluminación LED, Sistema de control mecánico de LEDs, Sistema de interrupciones, Pantalla LCD y Sistema de alimentación.

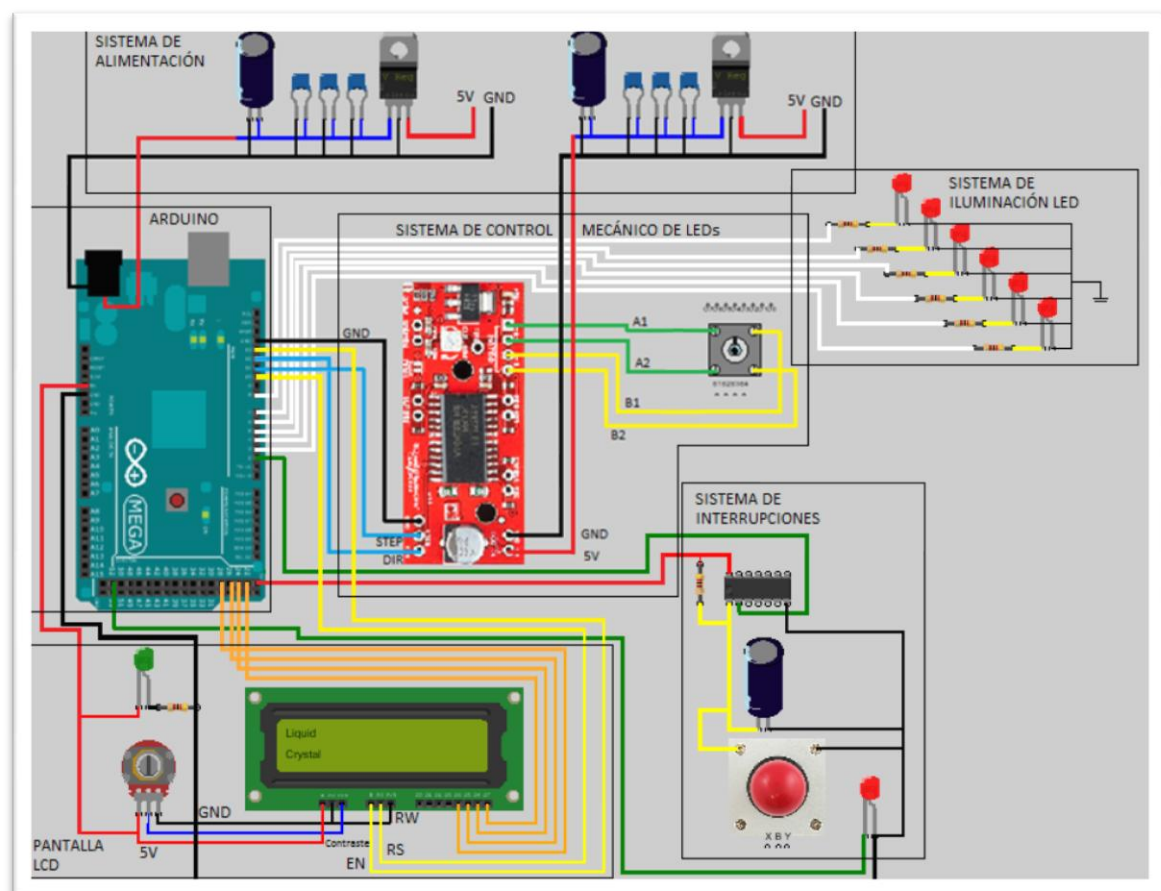


Figura 3.1: Diagrama de bloques

III.2. ARDUINO

Arduino es una plataforma de hardware libre, formada por una placa que dispone de un microcontrolador y un entorno de desarrollo. (Ver figura 3.2)

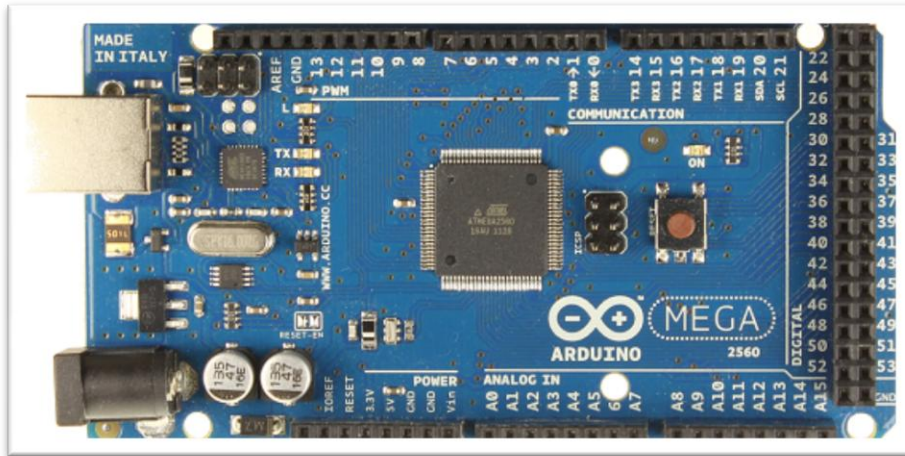


Figura 3.2: Arduino MEGA 2560

Los microcontroladores son de la gama Atmega, que se caracteriza por su sencillez y bajo coste, pero que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1290 y Atmega8. Desde 2012 se usan también microcontroladores CortexM3 de ARM de 32 bits. El microcontrolador que utiliza el Arduino de este proyecto fin de carrera es un Atmega2560, siendo de los últimos modelos que se pueden encontrar en el mercado.

Arduino puede ser utilizado para desarrollar sistemas autónomos o puede ser conectado a software de ordenador (por ejemplo Java, Flash, Processing, Macromedia, C, C++, Matlab, Pure Data...).

Las placas de Arduino se encuentran en el mercado con los componentes ya instalados, pero pueden ser montadas a mano.

El entorno de desarrollo integrado de serie en Arduino es totalmente gratuito y puede descargarse de su página web [4]. Tiene una interfaz sencilla, que permite programar el Arduino simplemente cliqueando en el botón “cargar”. (Ver figura 3.3)

Descripción del sistema

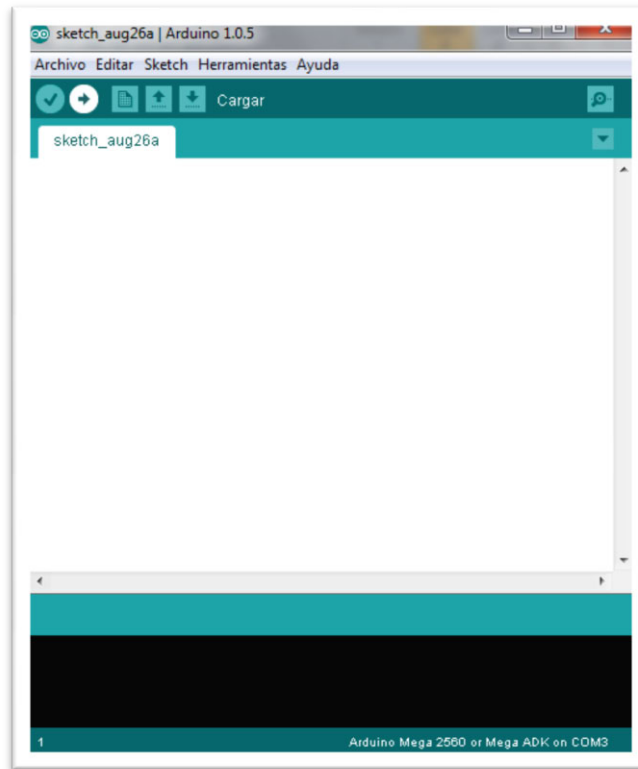


Figura 3.3: Interfaz del programa de desarrollo de Arduino

Arduino puede utilizarse de forma totalmente libre sin necesidad de adquirir una licencia, al ser open-hardware.

El Arduino utilizado en este proyecto es el modelo Arduino MEGA, con una placa controladora basada en el ATmega2560, el cual es una actualización del original Arduino Mega 1280. El Arduino Mega 2560 tiene las siguientes especificaciones:

Microcontrolador	ATmega2560
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendada)	7 - 12V
Voltaje de entrada (limite)	6 – 20V
Pines E/S digitales	54 (De las cuales 15 son PWM)
Pines entrada analógica	16
Intensidad por pin	40 mA
Intensidad en pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

Tabla 3.1: Especificaciones del Arduino Mega 2560

Descripción del sistema

El Arduino Mega se puede alimentar mediante una conexión USB o mediante una conexión externa con un conector Jack de 5.5x2.1 mm. Además, Arduino Mega cuenta con un minifusible reinicializable que protege al ordenador de sobretensiones y cortocircuitos.

Arduino Mega 2560 tiene 256 KB de memoria flash para almacenamiento de código (de los cuales 8 KB se utilizan para el sistema de arranque) 8 KB de SRAM y 4 KB de EEPROM. Estos valores son necesarios debido al gran peso que tiene el código del programa del proyecto fin de carrera.

Este modelo de placa de Arduino se caracteriza por tener un gran número de entradas/salidas, necesarias para controlar todos los sistemas periféricos que tiene este proyecto fin de carrera.

Las entradas de Arduino Mega 2560 utilizadas en este proyecto son las siguientes:

Entrada/Salida	Sistema periférico	Entrada/Salida	Sistema periférico
2	Entrada de interrupción	11	Entrada STEP del controlador de motor
3	LED 6	12	Entrada DIR del controlador de motor
A5			
4	LED 5	13	Entrada EN de la pantalla LCD
A4			
5	LED 4	22	Entrada DB7 de la pantalla LCD
A3			
6	LED 3	24	Entrada DB6 de la pantalla LCD
A2			
7	LED 2	26	Entrada DB5 de la pantalla LCD
A1			
8	LED 1	28	Entrada DB4 de la pantalla LCD
A0			
10	Entrada RS de la pantalla LCD	52	Señal de control del LED de interrupción

Tabla 3.2: Entradas/Salidas utilizadas del Arduino Mega 2560

III.3. SISTEMA DE ILUMINACIÓN LED

El sistema en el que se basa todo el proyecto fin de carrera es una batería de LED colocados para ser iluminados secuencialmente, y que son controlados por el Arduino. (Ver figura 3.4)

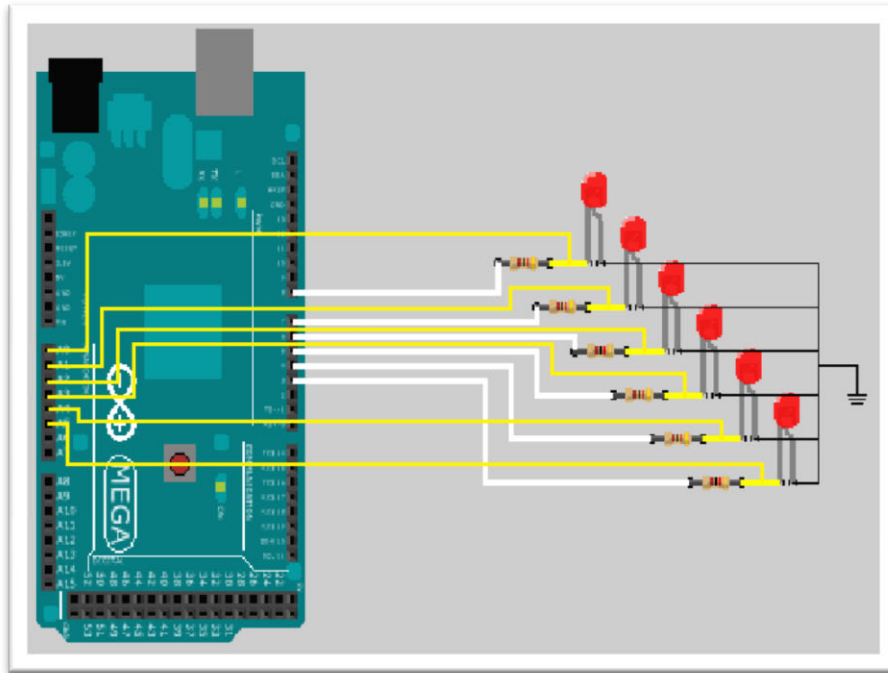


Figura 3.4: Simulación del sistema de iluminación LED

Los LEDs utilizados para este proyecto son LEDs de alta luminosidad de 5mm, con cubierta de plástico transparente.

Debido a que el analizador de espectros ópticos con el que se cuenta en el laboratorio de la universidad solo capta longitudes de onda entre 600 y 1600 nm, los LEDs utilizados para el proyecto fin de carrera solo podían ser de color naranja, rojo e infrarrojo. El problema surge cuando el Arduino Mega no es capaz de emitir una tensión de alimentación suficiente para cubrir la tensión de encendido de los LEDs naranjas y rojos contando con la caída de tensión en la resistencia. De este modo se pasa a utilizar únicamente LEDs del espectro infrarrojo de distintos fabricantes para realizar un estudio completo de la constante de Planck.

Diodo	Longitud de onda (λ)
Naranja	610 nm
Rojo	760 nm
Infrarrojo	960 nm

Tabla 3.3: Longitudes de onda de los LEDs

Para realizar una iluminación progresiva, el Arduino va aumentando la tensión de alimentación de cada LED de forma gradual. Esta alimentación proporcionada por el Arduino, se consigue mediante unas salidas especiales denominadas PWM (Modulación por Ancho de Pulso – Pulse Width Modulation) que son capaces de simular una salida analógica con una salida digital. La señal digital se controla para generar una onda cuadrada, una señal que conmuta constantemente entre encendido y apagado, entre 0 voltios (apagado) y 5 voltios (encendido). Al tiempo que está encendido se le llama Ancho de pulso (pulse width). Para variar el valor analógico se cambia, se modula, ese ancho de pulso.

Para emitir una tensión analógica que va incrementando su valor, lo único que se precisa es de un bucle que aumente el valor de encendido del ancho de pulso, es decir, que en vez de entre 0 y 5 voltios, empiece entre 0 y 0.001 (por ejemplo), y vaya aumentando el rango hasta llegar a los 5 voltios. Para ello se usa un contador digital entre 0 y 255, pues la función de escritura del bucle tiene un valor de conversión de:

$$\text{Valor de pulso} = \frac{5 * \text{valor de contador}}{255}$$

Para medir las tensiones de encendido de los LEDs se utilizan las entradas analógicas del Arduino. Estas entradas, al contrario que las PWM, tienen una relación de entrada entre 1 y 1024. Para poder utilizar el mismo valor de conversión se habrá de dividir la señal medida en las entradas analógicas por 4.

Como los diodos LED tienen que estar protegidos por una resistencia de un valor de 330Ω , se diseñó una placa de circuito impreso que permitiese implementar la conexión de los LEDs con sus respectivas resistencias y señales de control. (Ver figura 3.5)

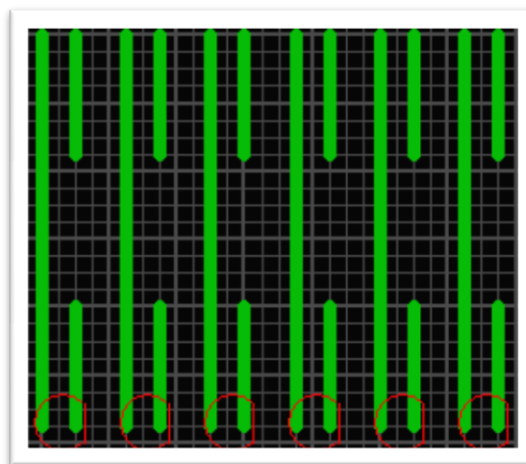


Figura 3.5: Placa de circuito impreso del sistema de iluminación LED

Descripción del sistema

El montaje físico del sistema de iluminación LED es el mostrado en la siguiente figura.

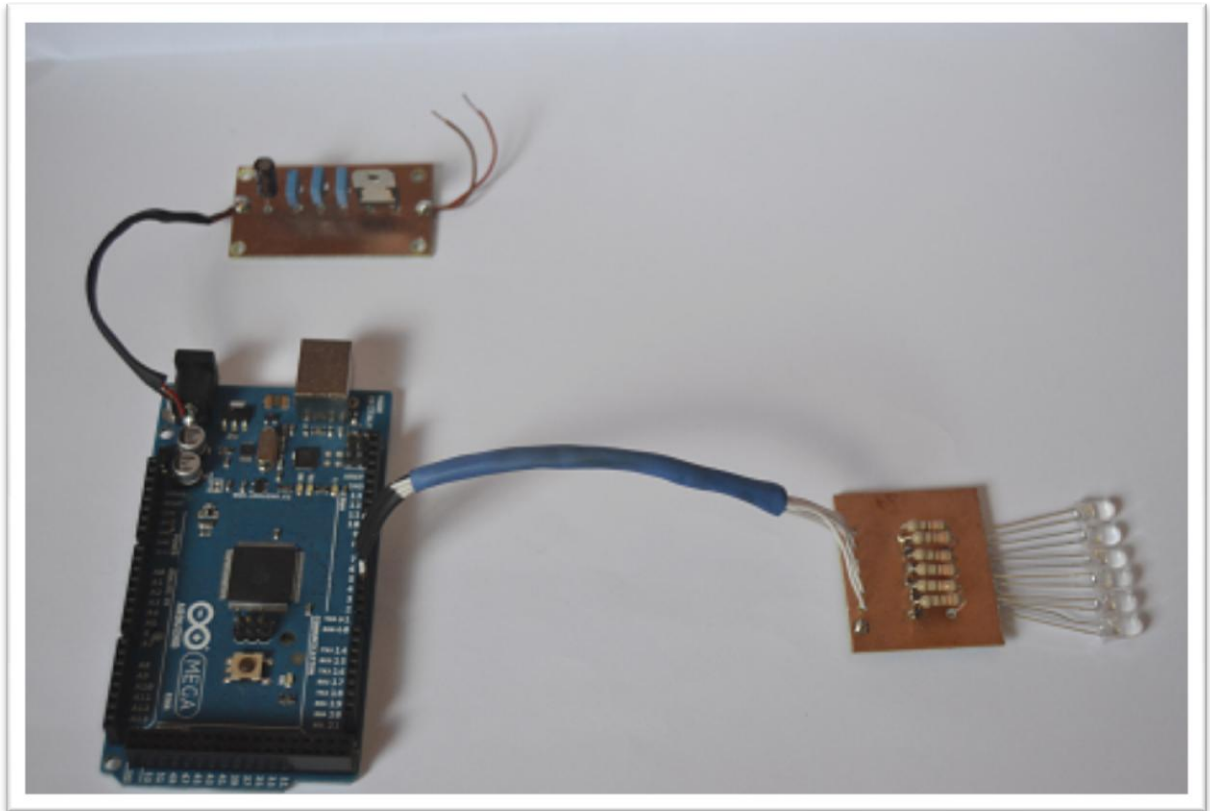


Figura 3.6: Montaje real del sistema de iluminación LED

En esta figura no se muestra el sistema de medida de la tensión de encendido, puesto que el sistema se implementó una vez estaba todo el equipo montado en la caja.

Los diodos LED infrarrojos tienen una tensión de ruptura de 5V (V_R) para una corriente de funcionamiento de 20mA (I_F). Estos datos se pueden apreciar en sus datasheet (Ver punto ANEXO 1).

Para un correcto funcionamiento, es necesario proteger estos diodos con una resistencia en serie. El valor de la resistencia viene dado por la ley de Ohm:

$$R_{polarización} = \frac{V_r}{I_F} = \frac{5}{20 * 10^{-3}} = 250\Omega$$

Es decir, el circuito de un LED tendría que tener una resistencia de polarización de, al menos, 250 Ω , por lo que para mayor seguridad se ha utilizado el valor estándar inmediatamente superior, 330 Ω .

Descripción del sistema

Para que los LEDs estuvieran correctamente enfrentados con la fibra óptica, se ha realizado un ajuste de altura mientras los LEDs emitían, observando la potencia lumínica que llegaba a un medidor de potencia HP 8140A como el de la siguiente figura:



Figura 3.7: Medidor de potencia HP 8140A

III.4. SISTEMA DE CONTROL MECÁNICO DE LEDS

Uno de los grandes problemas presentados a la hora de la realización de este proyecto fin de carrera, era la forma de realizar el enfrentamiento automático de los LEDs a la fibra óptica. Las soluciones de todos los diversos equipos similares que se podían encontrar era una forma totalmente manual. Cada vez que se quería cambiar la fibra de un LED a otro, se paraba el equipo y se cambiaba de conector la fibra.

Como se pretendía un equipo lo máximo autónomo posible se decidió incluir un sistema mecánico que fuera capaz de ir enfrentando los diversos LEDs a la fibra óptica.

Se decidió optar por un sistema controlado por un motor paso a paso Bipolar (PaP) (*ver figura 3.8*) gracias a que dichos motores son los que mayor precisión presentan a la hora de controlar el ángulo de giro del eje del motor, que puede variar desde 1.8° a 90° .

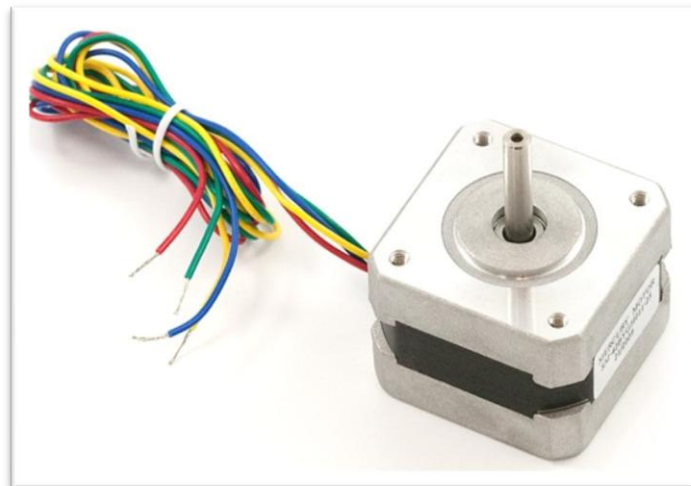


Figura 3.8: Motor paso a paso Bipolar

Estos motores se basan en la conversión de unos impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que dependiendo de una entrada de control se puede avanzar una serie de grados (pasos). Este tipo de motores se comporta como un conversor digital-analógico (D/A).

El funcionamiento de los motores paso a paso bipolares (el utilizado en este proyecto) se basa en el control de 2 bobinas, mediante las señales de control, que hacen girar un rotor. Dependiendo del sentido del flujo de corriente que se aplica en las bobinas se conseguirá un paso en un sentido o en otro. (*Ver figura 3.9*).

Descripción del sistema

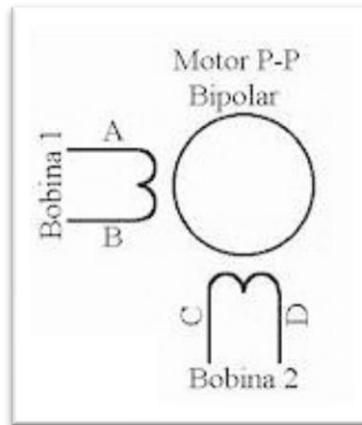


Figura 3.9: Esquema de un motor PaP Bipolar

La secuencia de alimentación de los motores paso a paso bipolares es la siguiente:

PASO	TERMINALES			
	A	B	C	D
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

Tabla 3.4: Secuencia de control de un motor PaP Bipolar

La identificación de los cables de un motor paso a paso bipolar se puede realizar con un voltímetro en modo óhmetro, de tal forma que aparecerá continuidad entre los pares de cables de cada bobina.

Debido a la considerable dificultad a la hora de controlar un motor paso a paso bipolar de forma directa con un Arduino, y principalmente debido a que el Arduino podía ser dañado por el motor, se utilizó un controlador EasyDriver (Ver figura 3.10) para Arduino.



Figura 3.10: Controlador EasyDriver

Descripción del sistema

Este controlador permite gobernar el motor paso a paso bipolar con solo dos señales de control del Arduino. Además, consta de un regulador que permite aislar la parte digital del Arduino de 5V, de la fuente de alimentación.

La conexión del controlador con el motor y el Arduino es la siguiente:

Arduino	Controlador		Motor		Alimentación
PIN 11	STEP (paso)		-		-
PIN 12	DIR (dirección)		-		-
GND	GND		-		-
-	MOTOR A	A1	BOBINA 1	A	-
		A2		B	-
-	MOTOR B	B1	BOBINA 2	C	-
		B2		D	-
	PWR IN	GND			GND
		M+			5V

Tabla 3.5: Conexiones Arduino – Controlador – Motor

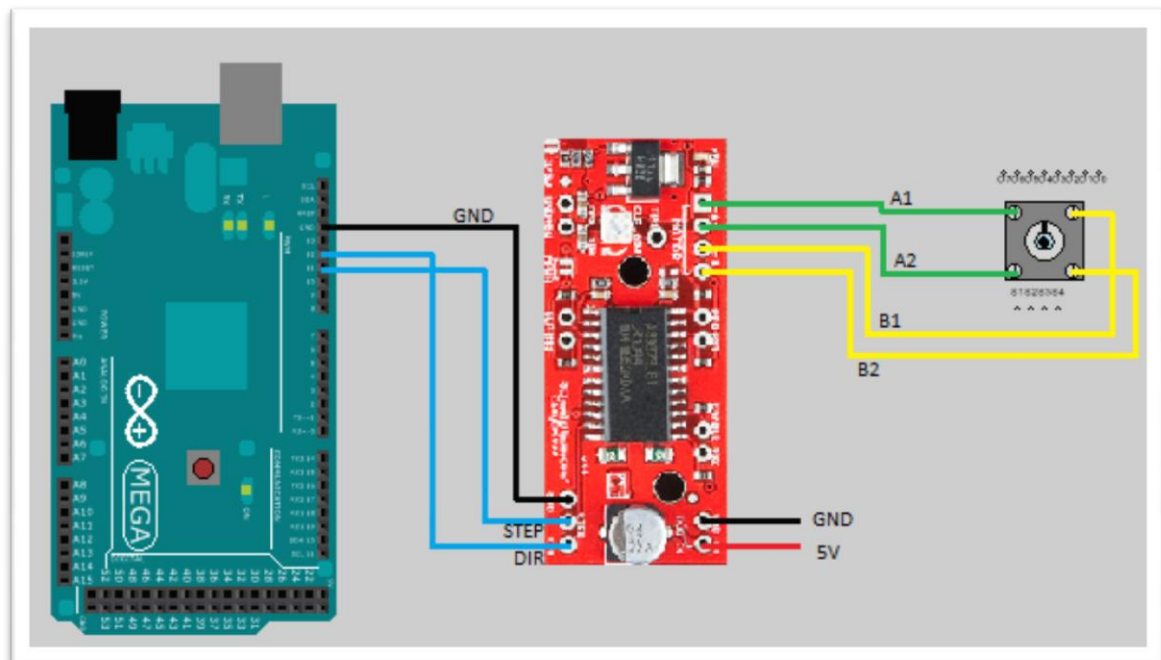


Figura 3.11: Simulación del sistema de control mecánico de LEDs

Descripción del sistema

Se contemplaron varias opciones para la estructura del sistema de control mecánico, pero las dos más sencillas eran la utilización de un sistema horizontal que desplazase los LEDs mediante un engranaje, o la utilización de un sistema circular que se aprovechara del movimiento circular del motor.

El sistema circular de selección de LEDs presentaba un gran inconveniente, debido a que según iba girando el motor, los cables que iluminaban los LEDs se iban retorciendo unos con otros, por lo que se decidió que no era una buena solución.

El sistema de engranaje horizontal no presentaba el problema de cables, pues estos podrían ir volados por encima del motor, y tener una holgura suficiente para no molestarse según se fueran desplazando.

El problema surge cuando no se puede encontrar unos engranajes que puedan convertir el movimiento circular del motor en un desplazamiento horizontal. Pero mientras se busca motores paso a paso bipolares reutilizables, se descubre que los sistemas de lectura de CDs, tanto de lectores de ordenador como de equipos de música, utilizan un motor paso a paso bipolar que mediante un engranaje en forma de tonillo sin fin desplaza una estructura, en la cual se encuentra el lector, de forma horizontal.

El sistema mecánico resultante después de desmontar la estructura del CD era perfectamente válido para cubrir las necesidades impuestas en el proyecto fin de carrera, por lo que se desmontó, limpió y preparó para su utilización. Además, el motor presentaba 4 puntos de soldadura en el bus de control de las bobinas, por lo que era fácil la conexión con el controlador para su posterior gobierno. (Ver figura 3.12)

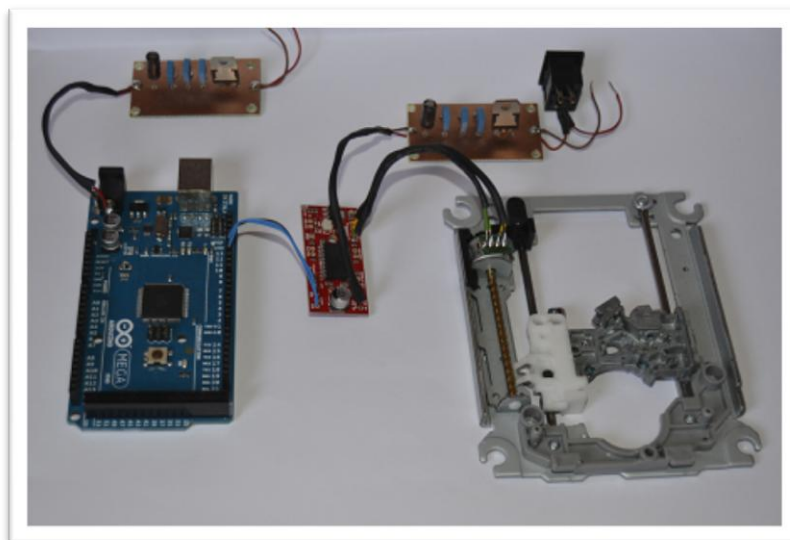


Figura 3.12: Montaje real del sistema de control mecánico de LEDs

III.5. PANTALLA LCD

Para la visualización de los resultados y del proceso llevado a cabo en cada momento por la placa Arduino Mega, se utiliza una pantalla LCD de 16x2. (Ver figura 3.13). Las pantallas LCD son dispositivos de cristal líquido (Liquid Crystal Display) que funcionan mediante la aplicación de un campo eléctrico que organiza las moléculas de cristal de la pantalla.



Figura 3.13: Pantalla LCD 16x2

Una pantalla LCD de 16x2 significa que puede mostrar 16 caracteres por línea, y consta de 2 de dichas líneas. La pantalla LCD muestra cada carácter en una matriz de 5x7 píxeles.

Las pantallas LCD tienen dos registros, el de mandos y el de datos.

El registro de mandos controla los comandos de control del LCD. Un comando es una instrucción dada al LCD para realizar una tarea predefinida como inicializar la pantalla, limpiarla, ajustar la posición del cursor...

El registro de datos almacena la información que se muestran en la pantalla LCD. Esta información son el valor ASCII del carácter que se visualizará en la pantalla LCD.

Este tipo de módulos es preferible a la utilización de displays de siete segmentos LED y a otros tipos de displays de segmentos múltiples, debido a que las pantallas LCD son económicas, fáciles de programar, no tienen limitaciones a la hora de mostrar caracteres especiales, y son fáciles de personalizar con diversas animaciones.

En el mercado existen pantallas ya preparadas para conectar a Arduino. Debido al incremento del precio por la conexión de Arduino se decidió comprar una pantalla virgen y realizar las conexiones a mano.

Descripción del sistema

Una pantalla LCD consta de 14 pines de conexión: (Ver tabla 3.6)

Nº PIN	Función	PIN del Arduino	Nº PIN	Función	PIN del Arduino
1	Vss	GND	8	DB1	-
2	Vcc	5V	9	DB2	-
3	Vee	Contraste	10	DB3	-
4	RS	13	11	DB4	28
5	RW	GND	12	DB5	26
6	EN	10	13	DB6	24
7	DB0	-	14	DB7	22

Tabla 3.6: Conexión de pantalla LCD

Para el control del contraste de la pantalla LCD se utilizó un potenciómetro de 10 K Ω conectados a la alimentación de la pantalla y al PIN 3.

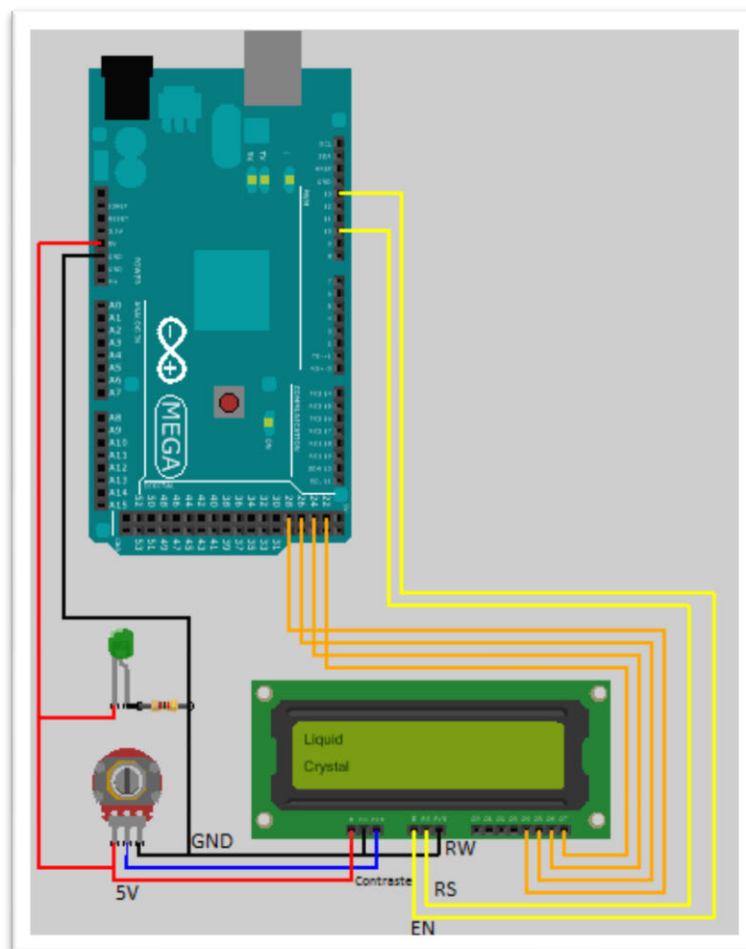


Figura 3.14: Simulación del sistema de la pantalla LCD

Descripción del sistema

Se utilizó un diodo LED de color verde para indicar el funcionamiento del sistema completo, y se aprovechó la alimentación de la pantalla LCD para conectarlo. Dicho diodo lleva conectado en serie una resistencia de 330 Ω .

El montaje físico del sistema de la pantalla LCD es el mostrado en las siguientes figuras:

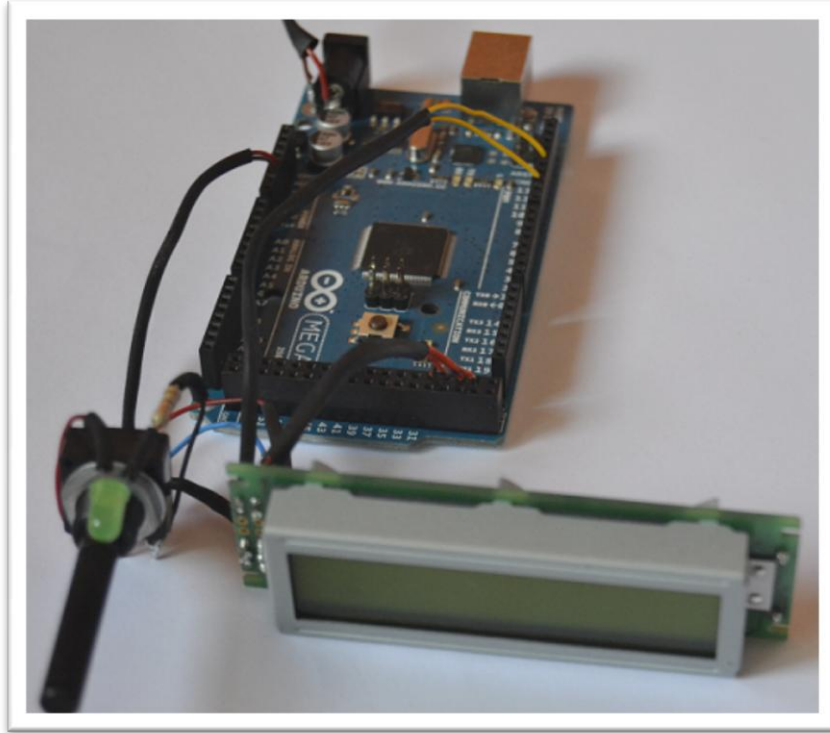


Figura 3.15: Montaje real del sistema de la pantalla LCD (1)

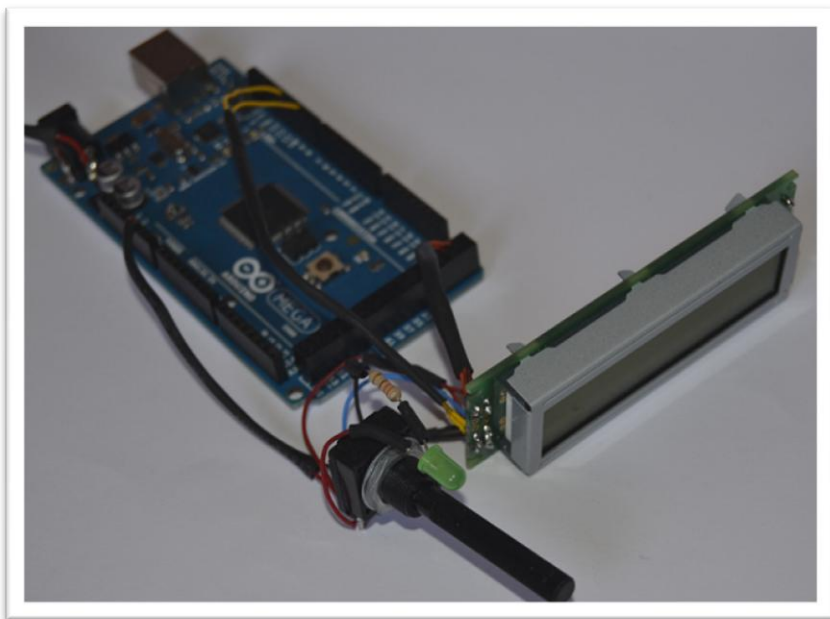


Figura 3.16: Montaje real del sistema de la pantalla LCD (2)

III.6. SISTEMA DE INTERRUPCIONES

Una vez realizada la medida de la tensión de encendido del LED, el posterior cálculo de la constante de Planck, se necesitaba que el Arduino entrase en un bucle infinito que permitiese al usuario observar detenidamente el espectro del LED en el analizador de espectros ópticos.

Para poder indicar al Arduino que se quiere finalizar el proceso con ese LED, y por consiguiente, seleccionar uno nuevo, se utiliza un sistema de interrupción externa mediante un pulsador. Dicho pulsador conecta a tierra el PIN de interrupción cuando es pulsado.

Puede ocurrir que cuando se realice la pulsación para una interrupción se produzcan fallos de detección (*Ver figura 3.17*). Eso es debido al pequeño rebote de la señal de entrada de interrupción por el ruido. Para obtener interrupciones limpias se incluyó un circuito integrado, un schmitt trigger, en este caso, el HEF40106BP y un condensador.

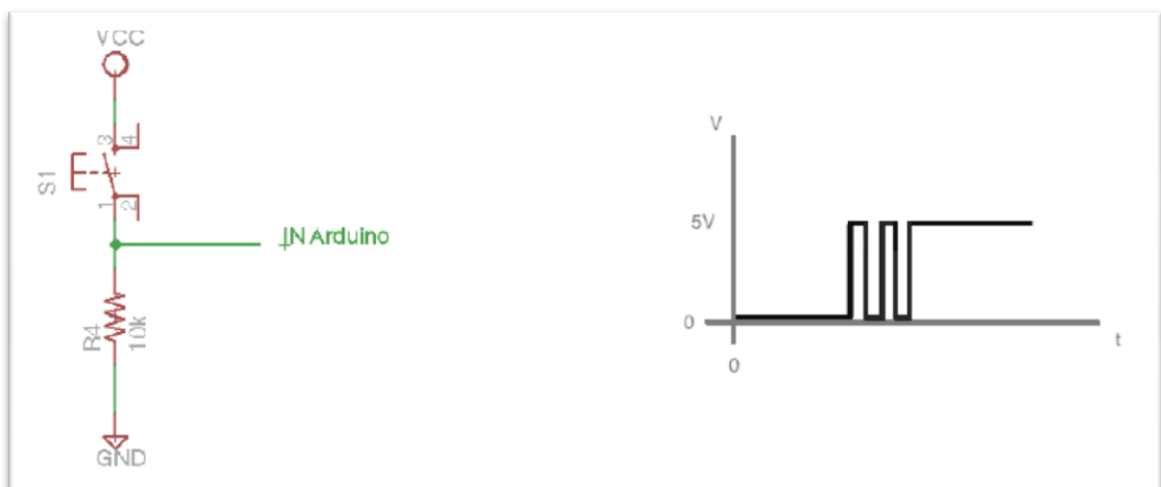


Figura 3.17: Interrupción sin schmitt trigger

Como se puede apreciar en la figura anterior, se producen varios cambios de estado de la señal de interrupción que provocan que el Arduino detecte interrupción en su PIN 2.

El schmitt trigger se encargará de prevenir el ruido que podría tapar a la señal original, y que podría causar falsos cambios de estado, provocando interrupciones sucesivas, quedando una señal de interrupción totalmente limpia. (*Ver figura 3.18*)

Descripción del sistema

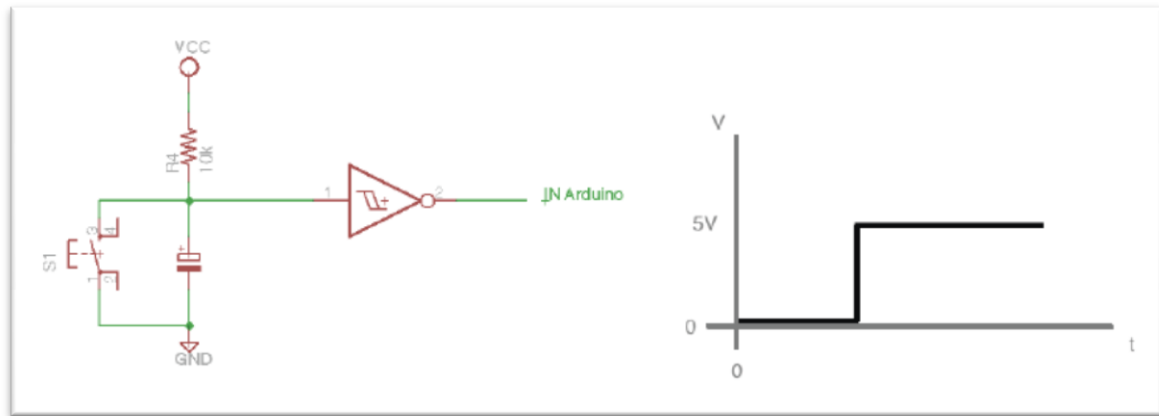


Figura 3.18: Interrupción con schmitt trigger

El schmitt trigger seleccionado para este proyecto fin de carrera cuenta con 14 pines de control. Permite realizar diversas operaciones con puertas lógicas según se conecte unas u otras entradas.

Para este proyecto fin de carrera solo se ha usado una configuración sencilla con una entrada y una salida para la depuración de la señal.

La conexión del schmitt trigger HEF40106BP utilizado en este proyecto fin de carrera es la siguiente:

Schmitt trigger		Schmitt trigger	
1	Patilla 1 R10KΩ Entrada C10μF Entrada pulsador	8	-
2	PIN 2 Arduino (Entrada interrupciones)	9	-
3	-	10	-
4	-	11	-
5	-	12	-
6	-	13	-
7	GND	14	V_{DD} (5v) Patilla 2 R10KΩ

Tabla 3.7: Conexiones del schmitt trigger

Descripción del sistema

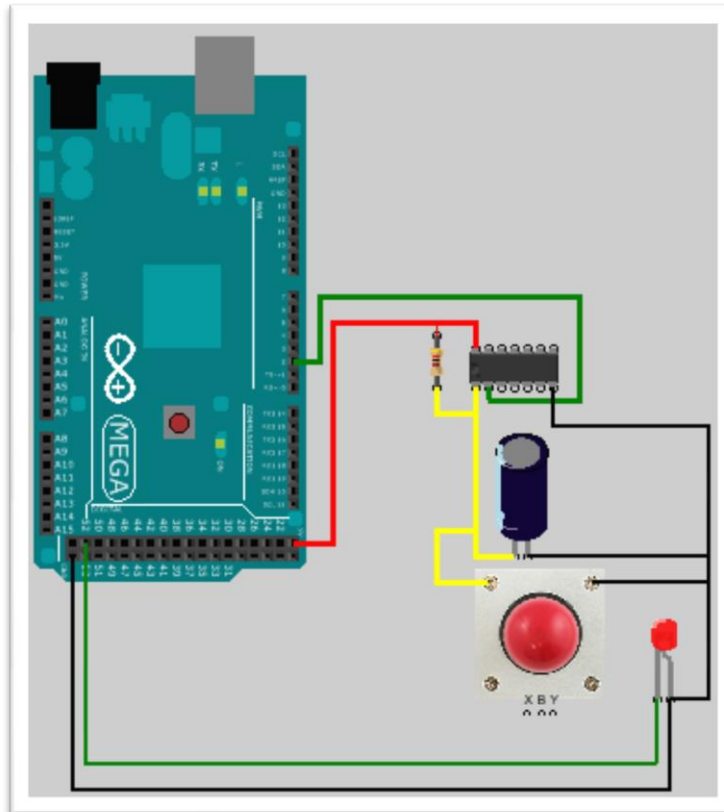


Figura 3.19: Simulación del sistema de interrupción

Para poder apreciar que se realiza una interrupción se introdujo un LED rojo de señalización. El LED se conectó al PIN 52 del Arduino. Cuando se realiza una interrupción externa, el Arduino cambia el estado del LED, y lo mantiene en ese estado hasta la próxima interrupción externa.

El montaje físico del sistema de interrupciones se realizó sobre una placa de circuito impreso que se fabricó en el laboratorio del DIAC en la universidad. (Ver figura 3.20)



Figura 3.20: Placa de circuito impreso del sistema de interrupción

Descripción del sistema

El montaje físico del sistema de interrupción es el mostrado en la siguiente figura:

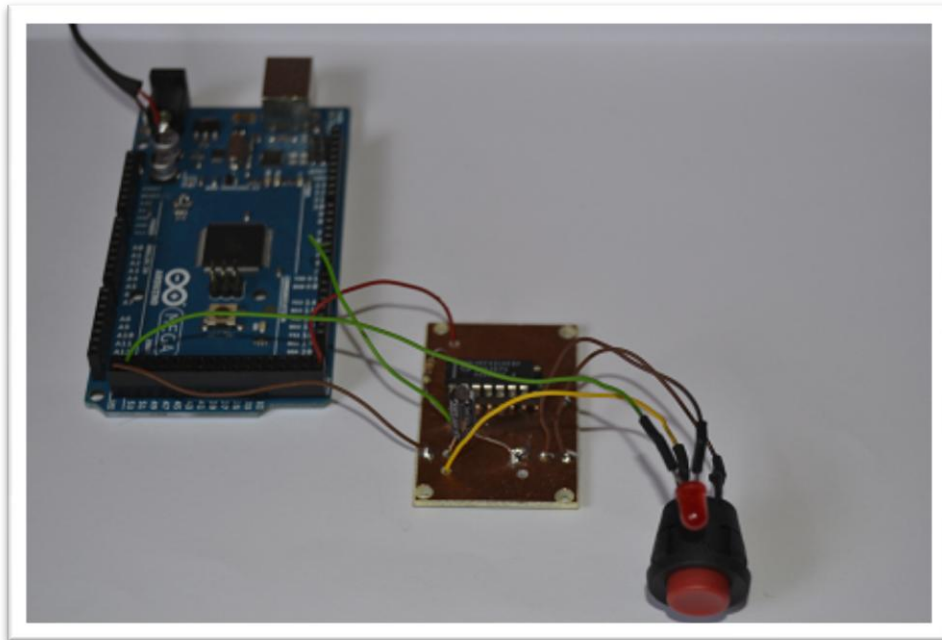


Figura 3.21: Montaje real del sistema de interrupción

III.7. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Para alimentar el equipo de medida se utiliza una fuente de alimentación de continua de las disponibles en los laboratorios de la universidad.

Para la conexión de la fuente y el equipo se utilizan cables con conectores de banana (Ver figura 3.22) en los extremos, para una sencilla conexión y desconexión.



Figura 3.22: Conectores de Banana

La placa controladora Arduino tiene una tensión de alimentación externa de 7 a 12V, por lo que se creó un sistema de alimentación con un regulador de tensión de 12V, un L7812CV. Como la placa controladora del motor, y dicho motor, funcionan entre 6V y 12V se creó otro sistema de alimentación con otro regulador de tensión de 12V.

Para proteger tanto el Arduino, como el bloque motor, se diseñaron unas placas de circuito impreso (Ver figura 3.23) que permitirían implementar un sistema de regulación.

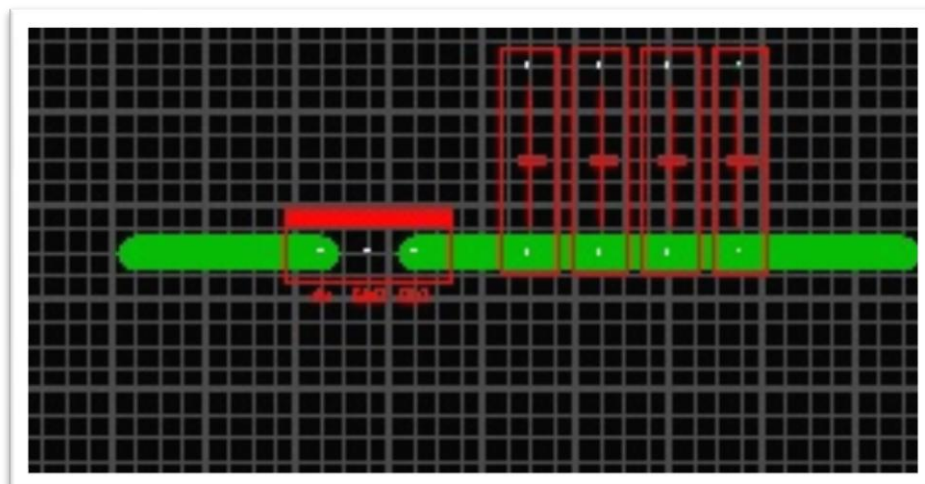


Figura 3.23: Placa de circuito impreso del sistema de alimentación

Descripción del sistema

El sistema de regulación está compuesto por un regulador, un bloque de condensadores cerámicos de 100, 10 y 1nF, y un condensador electrolítico de 10 μ F. (Ver figura 3.24)

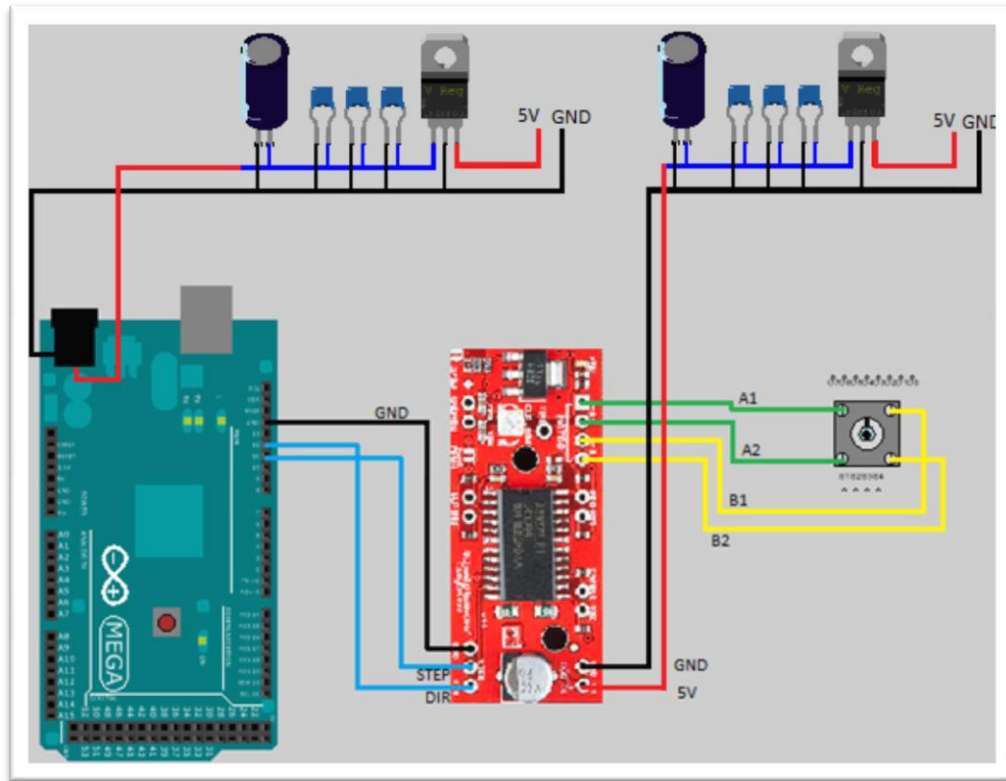


Figura 3.24: Simulación del sistema de alimentación

El montaje físico del sistema de alimentación es el mostrado en la siguiente figura:

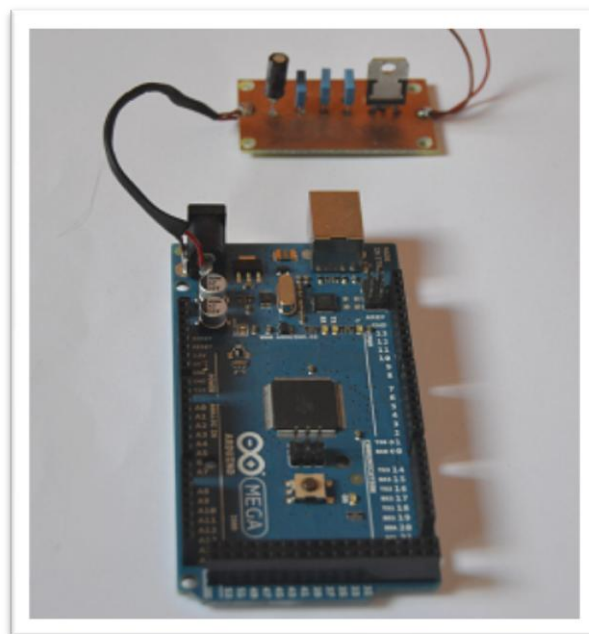


Figura 3.25: Montaje real del sistema de alimentación

III.8. ANALIZADOR DE ESPECTROS ÓPTICO (OSA) [9]

El analizador de espectros óptico (Optical Spectrum Analyzer, OSA) realiza medidas de potencia óptica en función de la longitud de onda, y es un valor esencial en el diseño, instalación y mantenimiento de los nuevos sistemas de transmisión de información por fibra óptica.

Un analizador de espectros óptico puede realizar caracterizaciones de fuentes de luz (LED y láseres) en función de su distribución de potencia y su pureza espectral. Además, puede realizar caracterizaciones en transmisión de componentes ópticos pasivos. Realizar unas medidas exactas solo es posible con el continuo calibrado de la escala de potencia y especialmente de la medida de su linealidad.

En comunicaciones ópticas, la anchura espectral de una fuente de luz es un parámetro muy importante debido a la dispersión cromática que presenta la fibra óptica y que limita el ancho de banda de modulación del sistema. El efecto de la dispersión cromática se aprecia en el dominio del tiempo como un ensanchamiento en la forma de onda del pulso digital (Ver figura 3.26)

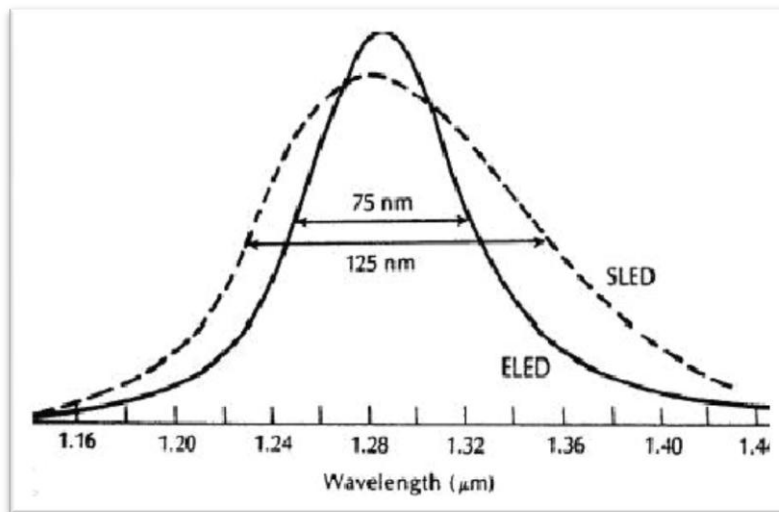


Figura 3.26: Espectro de una fuente LED (Figura obtenida de la referencia [8])

Como la dispersión cromática depende de la anchura espectral de la fuente de luz, es recomendable la utilización de fuentes de luz de anchura espectral muy estrecha para los sistemas de comunicaciones ópticas de alta velocidad.

Actualmente en el mercado se encuentran varios tipos de analizadores de espectros óptico. El analizador que se encuentra en el laboratorio de la escuela es un analizador

Descripción del sistema

de espectros basado en **redes de difracción**. Este tipo de analizadores son capaces de medir tanto espectros de LEDs como de láseres, presentan una resolución de longitud de onda variable entre 0.1 y 10 nm, presentan alto rango de operación, alta sensibilidad, y son los más comunes.

Una red de difracción es un componente óptico con un patrón regular, que divide (difracta) la luz en varios haces que viajan en diferentes direcciones. Dependiendo del espaciado de la red de difracción y de la longitud de onda de la luz incidente, las direcciones de esos haces separados viajarán en unas u otras direcciones. (Ver figura 3.27)

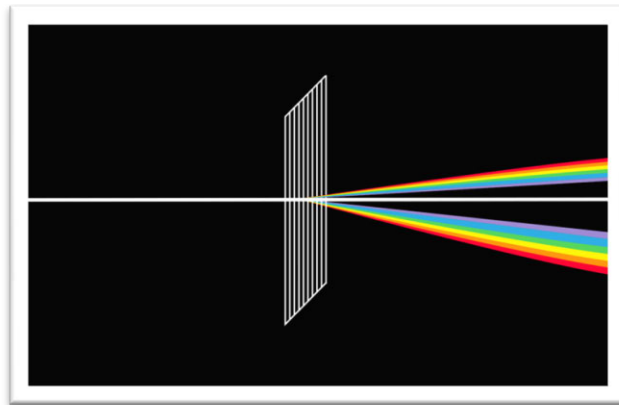


Figura 3.27: Red de difracción

El modelo de analizador de espectros óptico del laboratorio es un MS96A 0.6 – 1.6μm.

Es capaz de realizar medidas de longitudes de onda entre 600nm y 1750nm, que permite una amplia gama de aplicaciones, entre ellas la evaluación de fuentes de luz, la medición de las características de las pérdidas de longitud de onda y el análisis de sistemas WDM.



Figura 3.28: Analizador de espectros óptico disponible para el PFC

III.9. PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA ARDUINO

Para poder realizar una mejor y más clara explicación de los diversos bloques que forman parte del equipo de medida de la constante de Planck, se decidió realizar los esquemas virtuales vistos anteriormente.

Tanto para la simple realización de esquemas de conexión, para una simulación más profunda de los sistemas de Arduino, o para la práctica con sistemas antes de realizar su compra física, Arduino presenta un programa de simulación totalmente gratuito.

Dicho sistema es el **Virtual Breadboard**. Puede descargarse de la su página web <http://www.virtualbreadboard.com/Main.aspx?TAB=0>, y sirve como plataforma para la simulación de todo tipo de controladores. Además, permite realizar simulaciones con sistemas Android, tan de moda hoy en día.

En su página web se pueden encontrar gran número de tutoriales.

La interfaz del programa es bastante sencilla. Cuando lo iniciamos nos presenta un menú de selección de archivos (*Ver figura 3.29*) que nos permite seleccionar un nuevo archivo, ejemplos o cargar algún archivo realizado con anterioridad.



Figura 3.29: Pantalla de inicio de VBB

Descripción del sistema

Si es la primera vez que se utiliza el VBB se seleccionará la opción NEW y entraremos a la pantalla principal de diseño de sistemas (Ver figura 3.30).

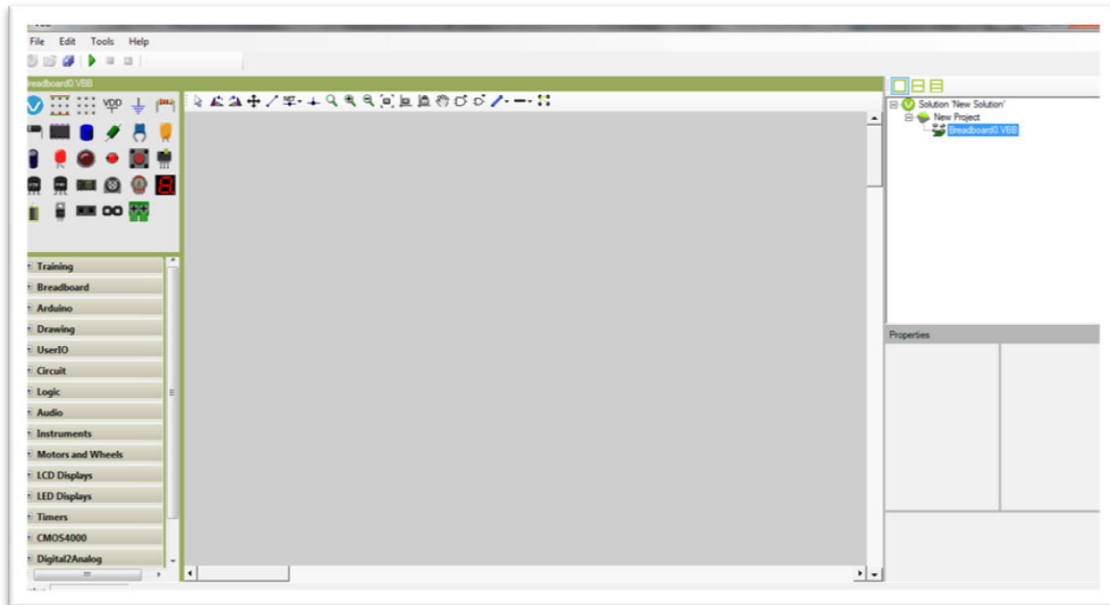


Figura 3.30: Pantalla principal de diseño de VBB

El menú de herramientas de la izquierda nos permite seleccionar todo tipo de elementos, presentando una pequeña preselección de los más utilizados en los sistemas realizados con Arduino. Además, en la pestaña “Arduino” podremos seleccionar el tipo de placa que deseemos utilizar (Ver figura 3.31).

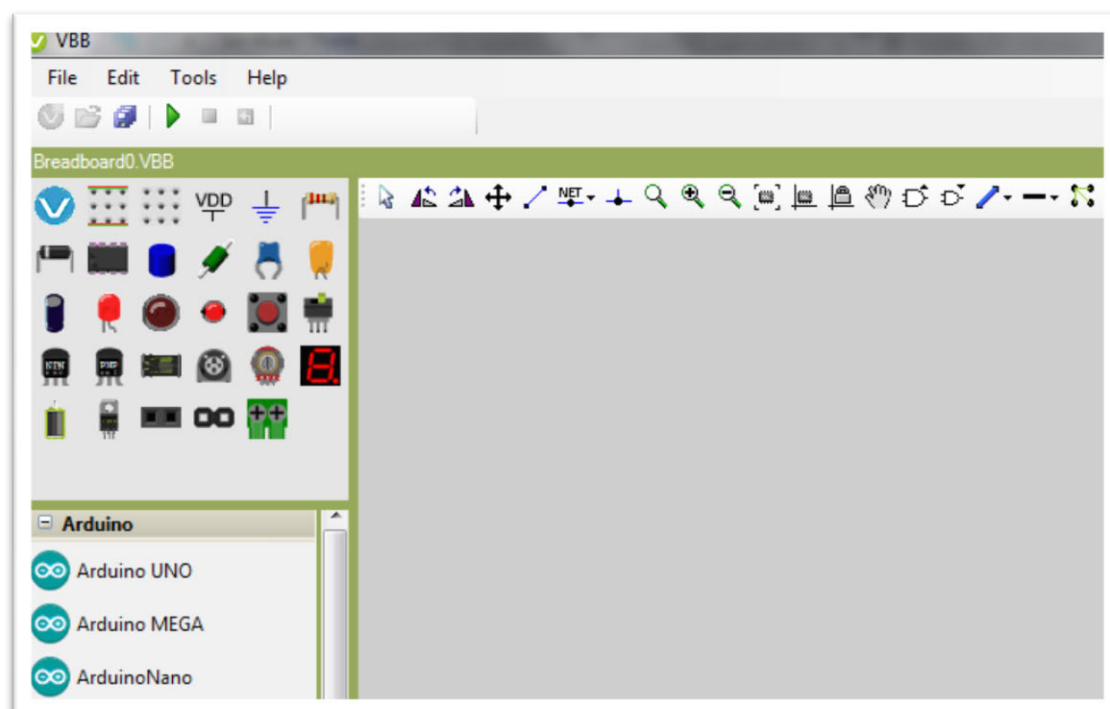


Figura 3.31: Selección de Arduino en VBB

Capítulo IV:

Descripción del código de programación del Arduino

IV. DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL ARDUINO

El lenguaje de programación de Arduino es un lenguaje propio. En general si el programador tiene un buen conocimiento de lenguajes de programación tales como C, C++ o Matlab, tendrá facilidad a la hora de programar el código de un Arduino gracias al gran número de similitudes que tienen estos lenguajes.

La página web oficial de Arduino presenta una serie de tutoriales, con pequeños ejemplos, que permiten conocer la gran mayoría de las funciones que se utilizan para los sistemas más simples en Arduino.

Si se quiere tener un conocimiento más extenso del lenguaje de programación Arduino, en su página web o en internet, se pueden encontrar sistemas mucho más complejos y completos.

El código desarrollado para el equipo de medida automático de la constante de Planck en diodos LED se ha dividido en grandes bloques, en función con el sistema (motor, interrupciones, cálculo, etc.) que se estuviese utilizando en ese momento.

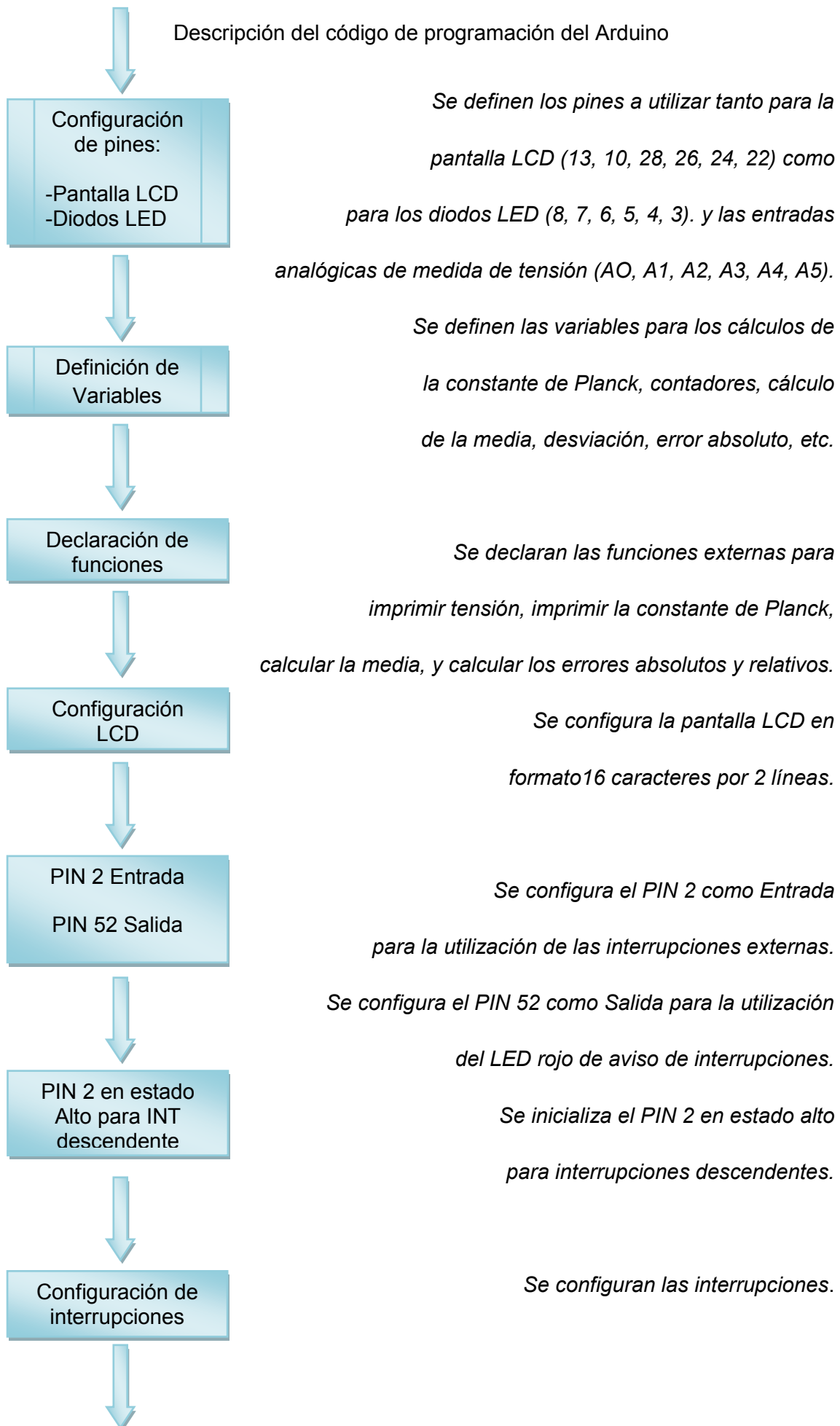
Para una mayor comodidad de lectura y comprensión, a continuación no se muestra en código como tal, sino un diagrama de flujo que presenta de forma más sencilla los pasos realizados por el código del equipo de medida. Si se desea consultar el código, hay una copia impresa en el departamento del Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones (DIAC) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

En el código de Arduino, el bucle de cálculo de la constante de Planck para un LED se realiza de forma secuencial para los 6 distintos LEDs. Aquí se ha mostrado para un solo LED, para no alargar sin necesidad el diagrama de flujo.

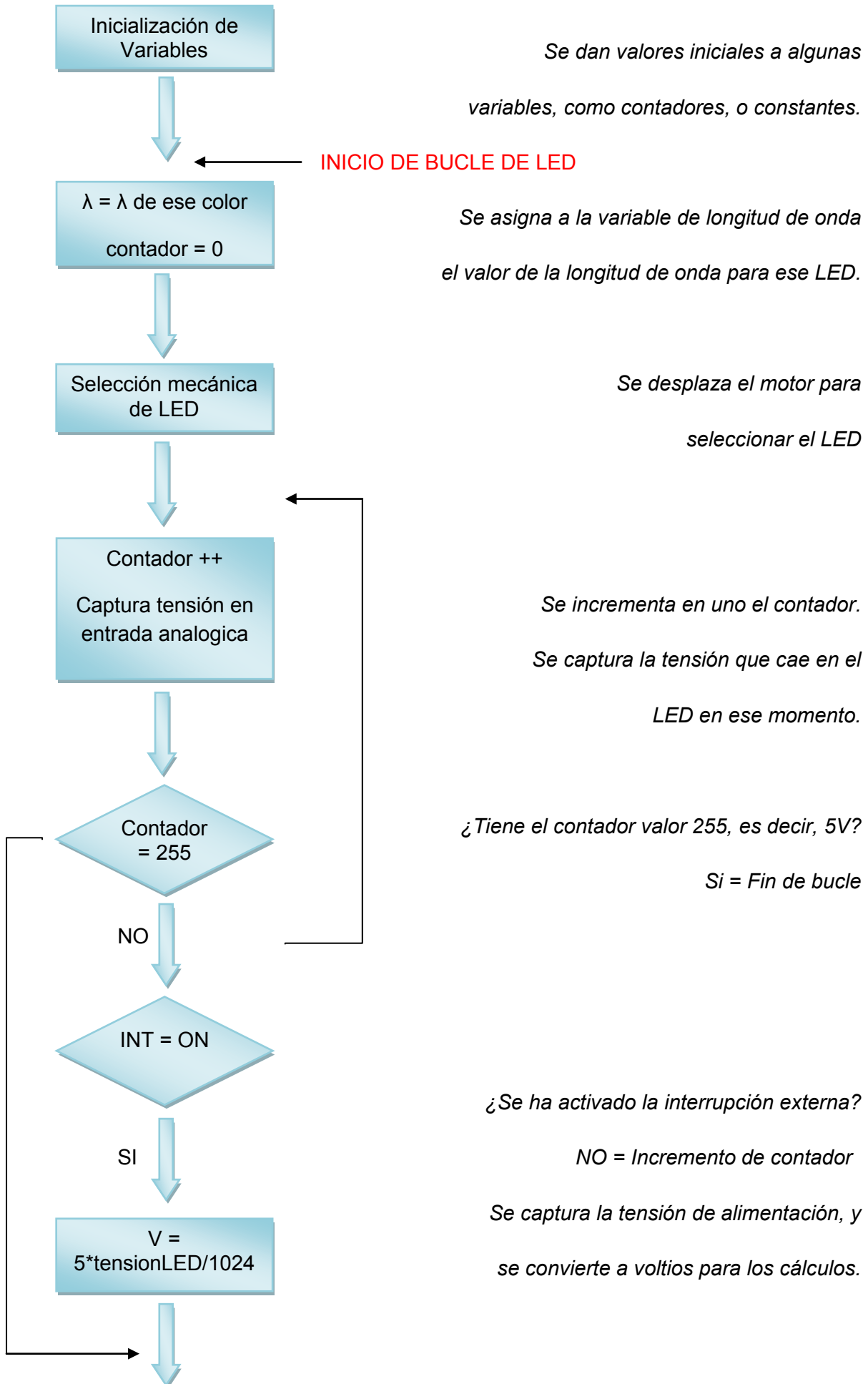


Se incluyen las librerías para poder utilizar las interrupciones externas del Arduino, y la pantalla LCD.

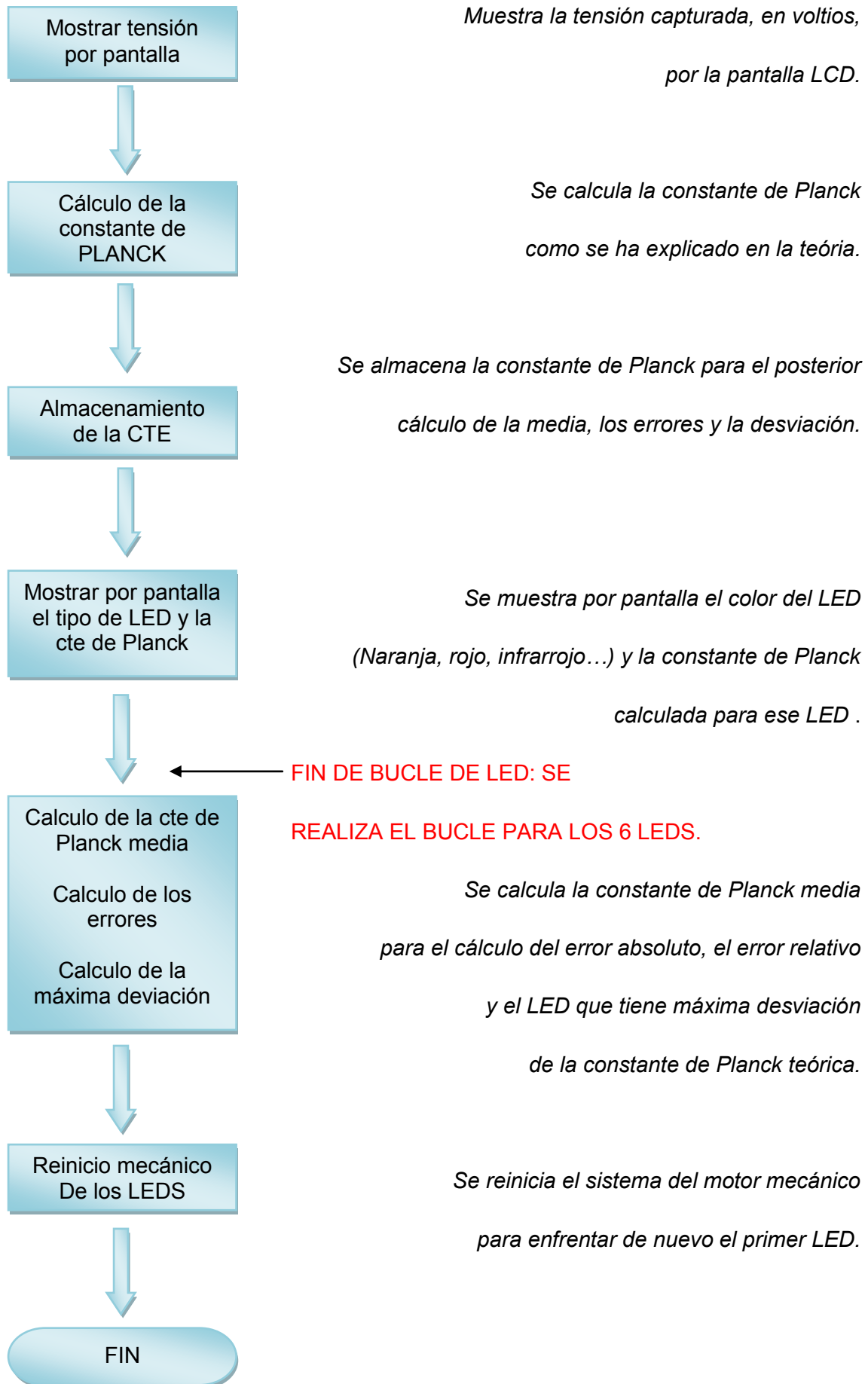
Descripción del código de programación del Arduino



Descripción del código de programación del Arduino



Descripción del código de programación del Arduino



Capítulo V:

Manual de usuario

V. MANUAL DE USUARIO

Para una correcta utilización del equipo de medida de la constante de Planck, a continuación se expondrá un pequeño manual de usuario paso a paso con la forma de alimentar el equipo, su funcionamiento, un ejemplo de medida para cada LED, y los resultados finales.

Alimentación

La conexión para la alimentación se realiza con cables que dispongan de conectores de banana en sus extremos como los que se explicaron en el punto III.7. Se configura la fuente de alimentación para que genere una tensión de alimentación de 9Vc para el Arduino y 7Vc para el motor. (Ver figura 5.1)

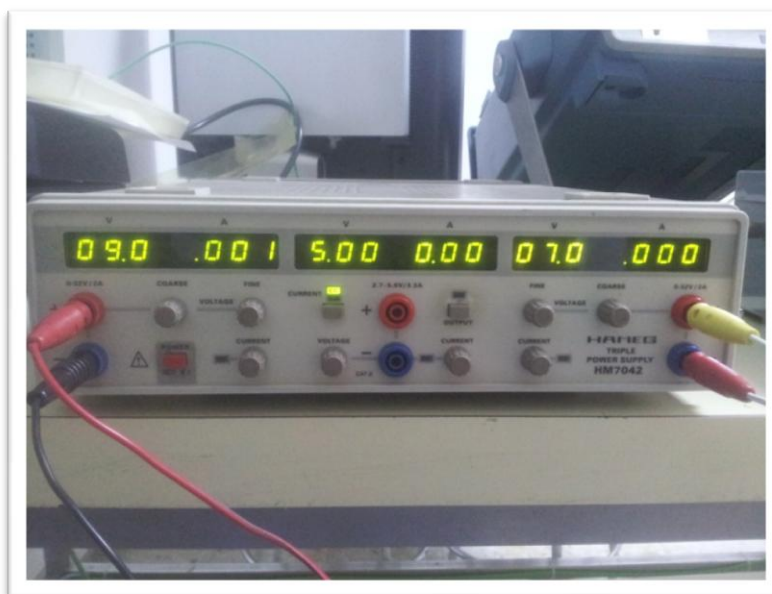


Figura 5.1: Fuente de alimentación

Los otros extremos de los cables con conectores de banana se conectan a las entradas de alimentación que tiene en equipo en su parte posterior. Hay que cerciorarse de que la alimentación de 9Vc se introduce en los conectores del Arduino, y la alimentación de 7Vc en los conectores del motor. (Ver figura 5.2)



Figura 5.2: Conexión de alimentación del equipo de medida

Conexión de la fibra óptica

En ese momento se realiza la conexión del cable de fibra óptica. Se introduce el cable en el conector FC de fibra óptica del equipo de medida (*Ver figura 5.3*), teniendo cuidado de la muesca que tiene en la parte de arriba.



Figura 5.3: Conexión de la FO en el equipo de medida

El otro extremo de la fibra óptica se conectará en el analizador de espectros ópticos.
(Ver figura 5.4)



Figura 5.4: Conexión de la FO en el analizador de espectros

Inicio del proceso automático de medida de la constante de Planck

Una vez realizada la conexión se activará la salida de alimentación de la fuente de alimentación y empezará a funcionar el equipo.

La placa Arduino nos informa del inicio del programa con la siguiente pantalla:



Figura 5.5: Pantalla de inicio

Para comenzar iluminando el primer LED, la configuración de la batería de LEDs que se puede encontrar al comienzo del programa es la siguiente:

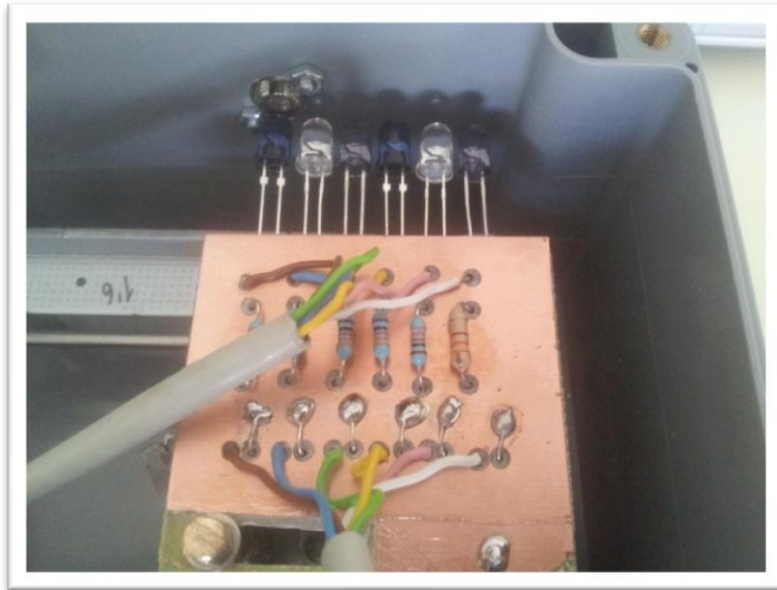


Figura 5.6: Estado de LEDs al inicio

LED infrarrojo número 1

Cuando el Arduino empieza la alimentación de forma automática del primer LED muestra la siguiente pantalla:



Figura 5.7: Incremento de tensión LED 1

Mientras esté esa pantalla presente se está realizando el proceso de aumento de tensión automático entre 0 y 5Vc de la salida PWM correspondiente al primer LED, en este caso, la salida PWM PIN 8.

Una vez realizada la total alimentación del LED se procede a capturar su tensión de alimentación mediante la entrada analógica correspondiente, en este caso la ANALOG 0, y se muestra por pantalla. (Ver figura 5.8)



Figura 5.8: Tensión LED 1

A continuación el Arduino realiza los cálculos necesarios para hallar la constante de Planck (Ver figura 5.9) y la almacena para los cálculos finales.



Figura 5.9: Constante de Planck LED 1

Mostrada la constante de Planck, el Arduino entra en el bucle infinito que permite al usuario observar el espectro del LED iluminado en ese momento con la tensión de funcionamiento. Para indicar al usuario que la placa se encuentra en ese bucle infinito, ilumina el LED rojo situado encima del pulsador de interrupción que el usuario necesita pulsar para saltar del bucle, y muestra por pantalla lo siguiente:



Figura 5.10: Pantalla de bucle infinito

En ese momento el usuario ajustará el analizador de espectros para obtener una visión clara del espectro del primer LED. (Ver figuras 5.11 y 5.12)

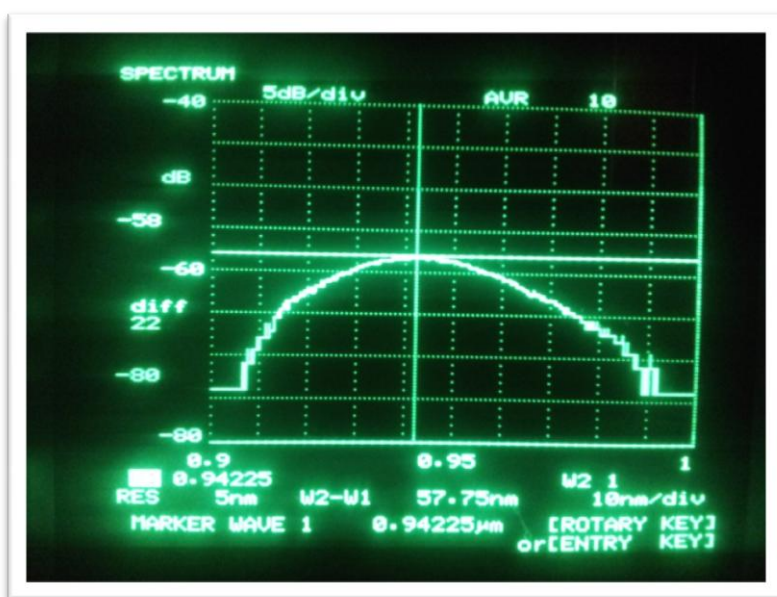


Figura 5.11: Espectro de LED 1 – Longitud de onda

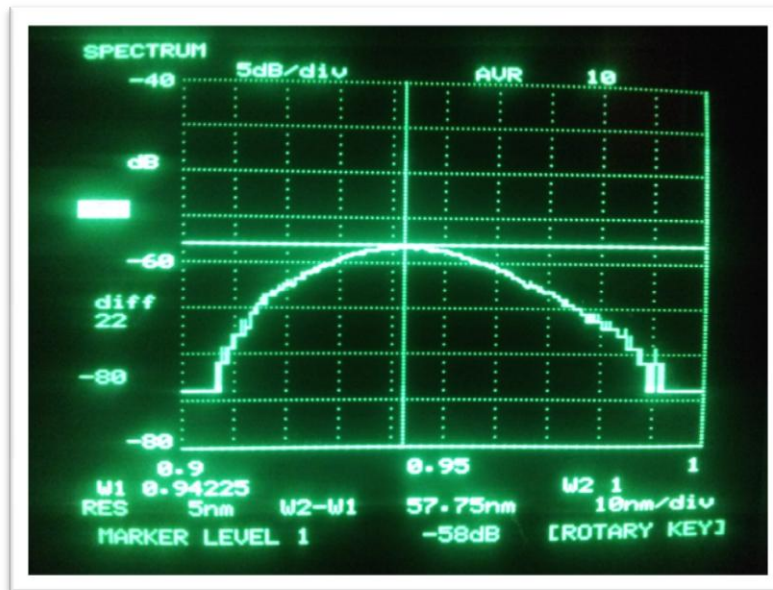


Figura 5.12: Espectro de LED 1 – Nivel de señal

LED infrarrojo número 2

Cuando se decide continuar, se pulsa el botón de interrupción y el motor paso a paso enfrenta el segundo LED a la fibra óptica. (Ver figura 5.13).

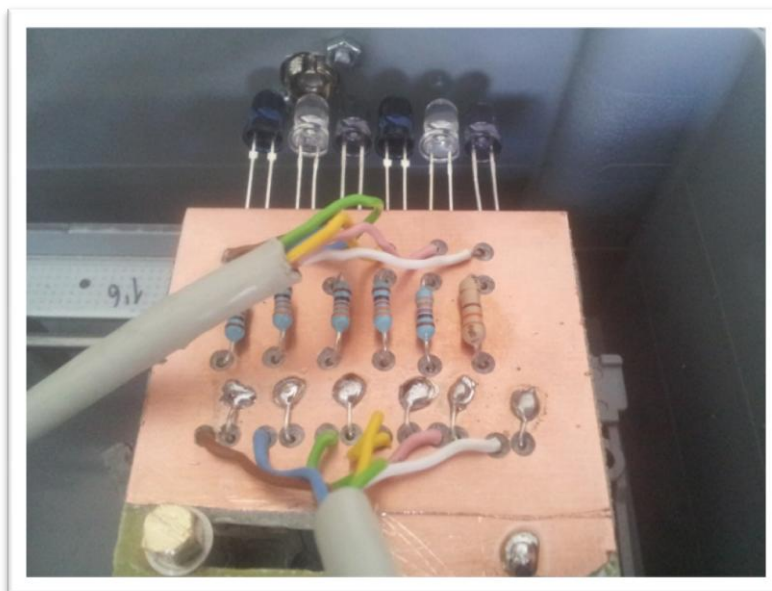


Figura 5.13: LED 2 enfrentado a la FO

Una vez enfrentado, el Arduino comienza a alimentar el segundo LED con la salida PWM PIN 7, y muestra por pantalla este proceso. (Ver figura 5.14)



Figura 5.14: Incremento de tensión LED 2

Cuando finaliza el proceso de alimentación del segundo LED, se muestra por pantalla la tensión de encendido del LED 2 (*Ver figura 5.15*) que se captura con la entrada analógica ANALOG 1, y la constante de Planck para ese valor de tensión. (*Ver figura 5.16*)



Figura 5.15: Tensión LED 2



Figura 5.16: Constante de Planck LED 2

Calculada y almacenada la constante de Planck, comienza de nuevo el bucle infinito de alimentación con tensión de funcionamiento que permite observar el espectro, en este caso del LED 2, obteniendo las medidas para la longitud de onda de ese LED y su nivel de señal. (Ver figuras 5.17 y 5.18)

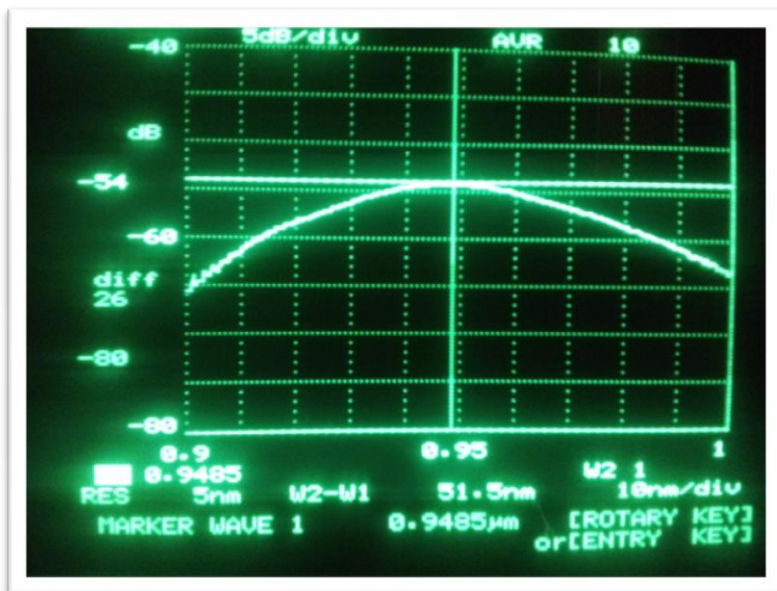


Figura 5.17: Espectro LED 2 – Longitud de onda



Figura 5.18: Espectro LED 2 – Nivel de señal

LED infrarrojo número 3

Cuando se decide continuar, se pulsa el botón de interrupción y el motor paso a paso enfrenta el tercer LED a la fibra óptica. (Ver figura 5.19).

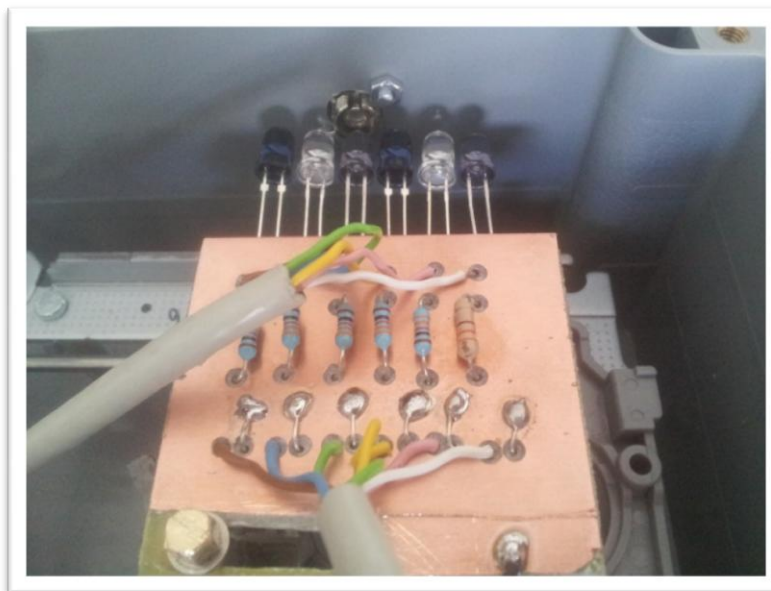


Figura 5.19: LED 3 enfrentado a la FO

Una vez enfrentado, el Arduino comienza a alimentar el tercer LED con la salida PWM PIN 6, y muestra por pantalla este proceso. (Ver figura 5.20)



Figura 5.20: Incremento de tensión LED 3

Cuando finaliza el proceso de alimentación del tercer LED, se muestra por pantalla la tensión de encendido del LED 3 (*Ver figura 5.21*) que se captura con la entrada analógica ANALOG 2, y la constante de Planck para ese valor de tensión. (*Ver figura 5.22*).



Figura 5.21: Tensión LED 3



Figura 5.22: Constante de Planck LED 3

Calculada y almacenada la constante de Planck, comienza de nuevo el bucle infinito de alimentación con tensión de funcionamiento que permite observar el espectro, en este caso del LED 3, obteniendo las medidas para la longitud de onda de ese LED y su nivel de señal. (Ver figuras 5.23 y 5.24)

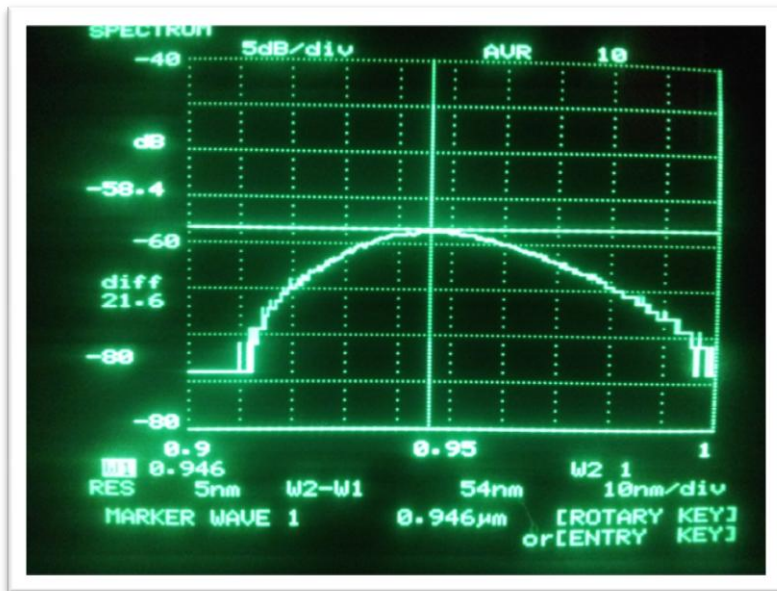


Figura 5.23: Espectro LED 3 – Longitud de onda

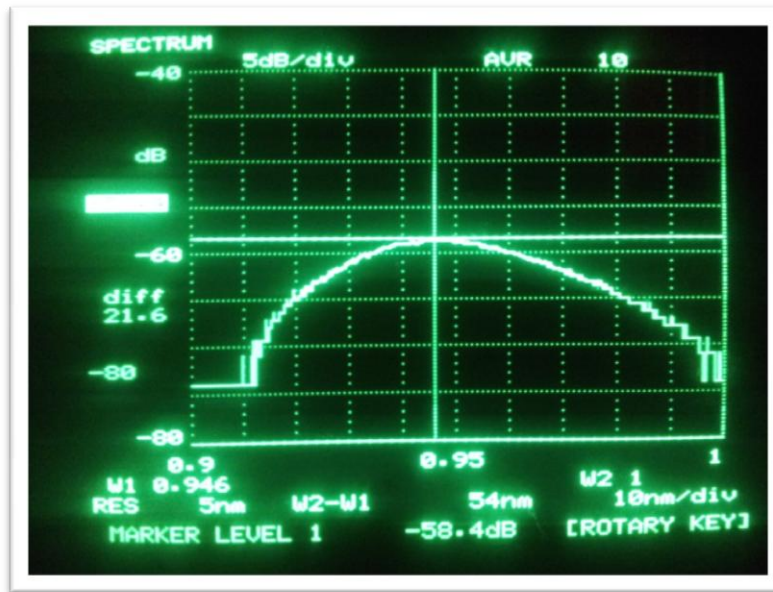


Figura 5.24: Espectro LED 3 – Nivel de señal

LED infrarrojo número 4

Cuando se decide continuar, se pulsa el botón de interrupción y el motor paso a paso enfrenta el cuarto LED a la fibra óptica. (Ver figura 5.25).

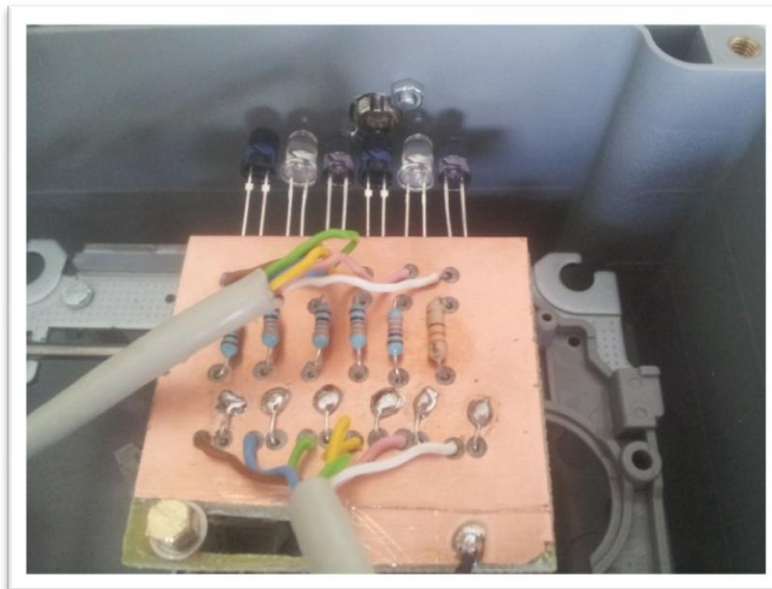


Figura 5.25: LED 4 enfrentado a la FO

Una vez enfrentado, el Arduino comienza a alimentar el cuarto LED con la salida PWM PIN 5, y muestra por pantalla este proceso. (Ver figura 5.26)



Figura 5.26: Incremento de tensión LED 4

Cuando finaliza el proceso de alimentación del cuarto LED, se muestra por pantalla la tensión de encendido del LED 4 (Ver figura 5.27) que se captura con la entrada analógica ANALOG 3, y la constante de Planck para ese valor de tensión. (Ver figura 5.28).



Figura 5.27: Tensión LED 4



Figura 5.28: Constante de Planck LED 4

Calculada y almacenada la constante de Planck, comienza de nuevo el bucle infinito de alimentación con tensión de funcionamiento que permite observar el espectro, en este caso del LED 4, obteniendo las medidas para la longitud de onda de ese LED y su nivel de señal. (Ver figuras 5.29 y 5.30)

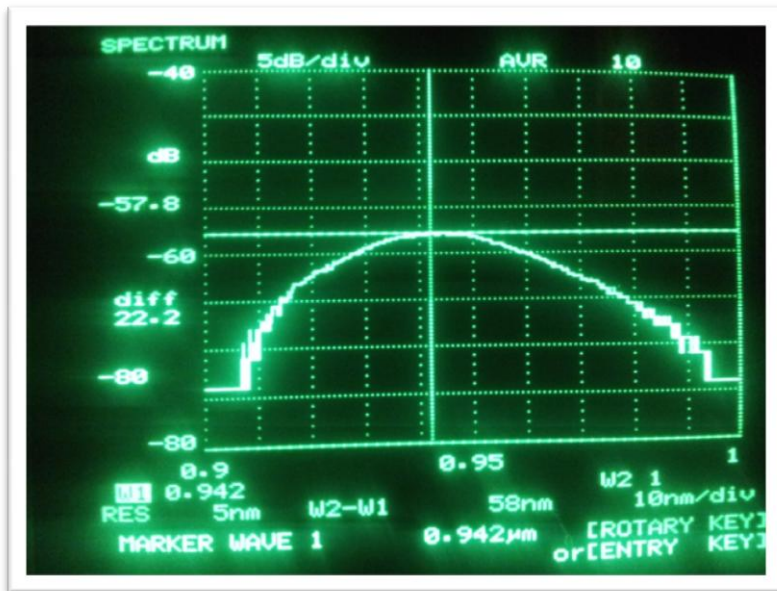


Figura 5.29: Espectro LED 4 – Longitud de onda

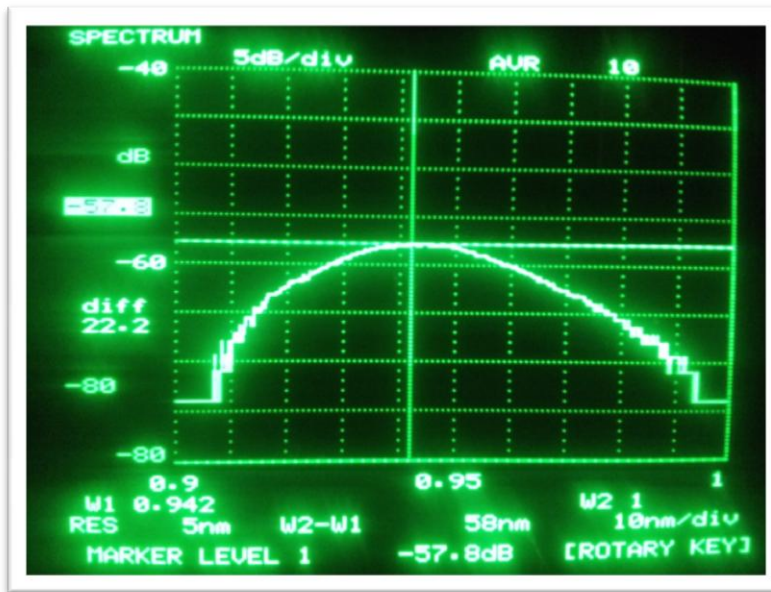


Figura 5.30: Espectro LED 4 – Nivel de señal

LED infrarrojo número 5

Cuando se decide continuar, se pulsa el botón de interrupción y el motor paso a paso enfrenta el quinto LED a la fibra óptica. (Ver figura 5.31).

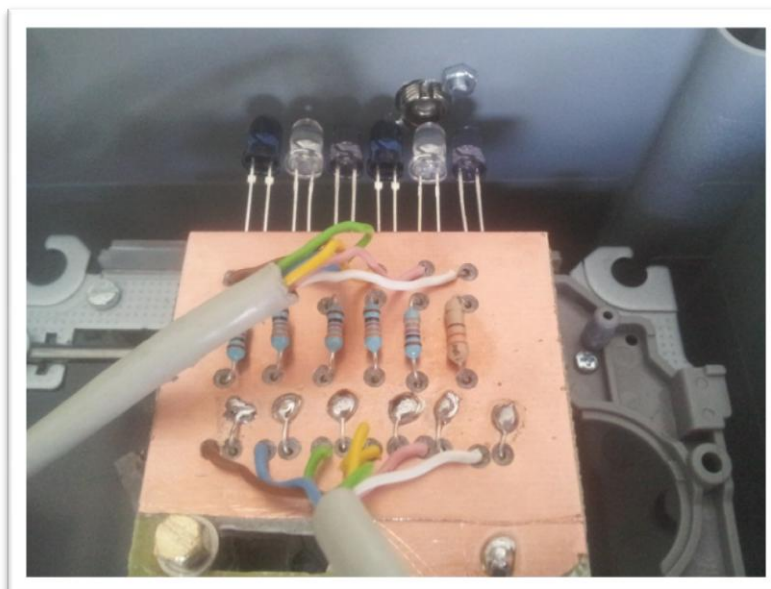


Figura 5.31: LED 5 enfrentado a la FO

Una vez enfrentado, el Arduino comienza a alimentar el quinto LED con la salida PWM PIN 4, y muestra por pantalla este proceso. (Ver figura 5.32)



Figura 5.32: Incremento de tensión LED 5

Cuando finaliza el proceso de alimentación del quinto LED, se muestra por pantalla la tensión de encendido del LED 5 (Ver figura 5.33) que se captura con la entrada analógica ANALOG 4, y la constante de Planck para ese valor de tensión. (Ver figura 5.34).



Figura 5.33: Tensión LED 5



Figura 5.34: Constante de Planck LED 5

Calculada y almacenada la constante de Planck, comienza de nuevo el bucle infinito de alimentación con tensión de funcionamiento que permite observar el espectro, en este caso del LED 5, obteniendo las medidas para la longitud de onda de ese LED y su nivel de señal. (Ver figuras 5.35 y 5.36)

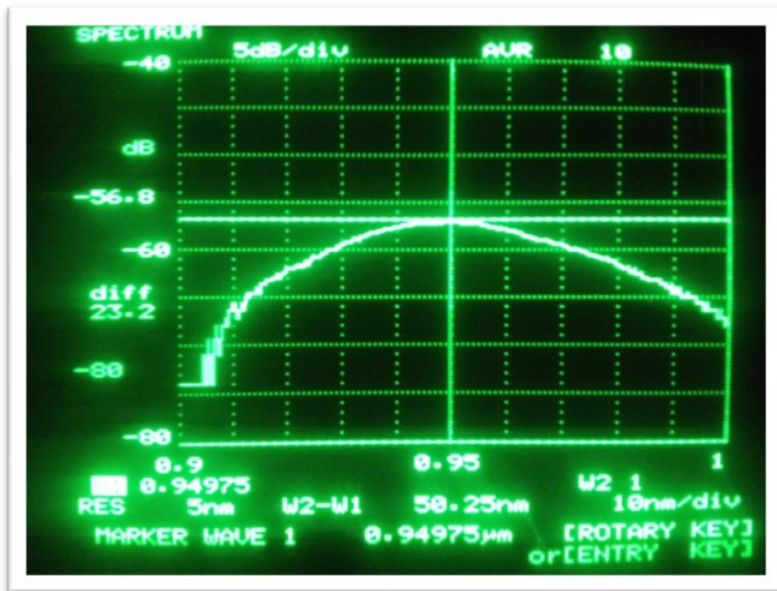


Figura 5.35: Espectro LED 5 – Longitud de onda

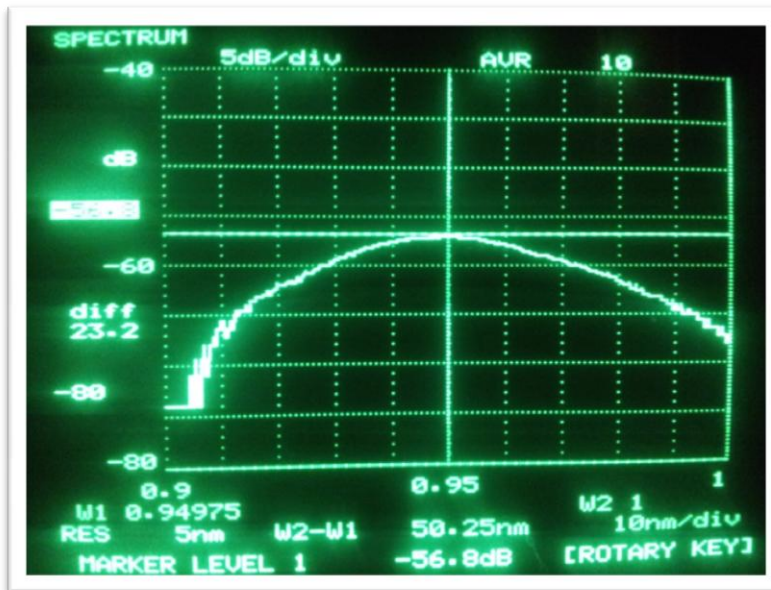


Figura 5.36: Espectro LED 5 – Nivel de señal

LED infrarrojo número 6

Cuando se decide continuar, se pulsa el botón de interrupción y el motor paso a paso enfrenta el sexto LED a la fibra óptica. (Ver figura 5.37).

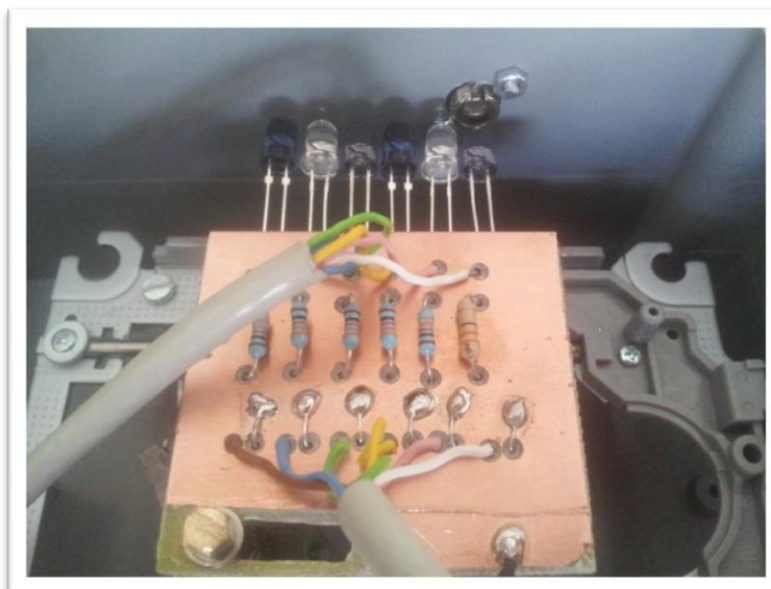


Figura 5.37: LED 6 enfrentado a la FO

Una vez enfrentado el último LED, el Arduino comienza a alimentar el sexto LED con la salida PWM PIN 3, y muestra por pantalla este proceso. (Ver figura 5.38)



Figura 5.38: Incremento de tensión LED 6

Cuando finaliza el proceso de alimentación del sexto LED, se muestra por pantalla la tensión de encendido del LED 6 (*Ver figura 5.39*) que se captura con la entrada analógica ANALOG 5, y la constante de Planck para ese valor de tensión. (*Ver figura 5.40*).



Figura 5.39: Tensión LED 6



Figura 5.40: Constante de Planck LED 6

Calculada y almacenada la constante de Planck, comienza de nuevo el bucle infinito de alimentación con tensión de funcionamiento que permite observar el espectro, en este caso del LED 6, obteniendo las medidas para la longitud de onda de ese LED y su nivel de señal. (Ver figuras 5.41 y 5.42)

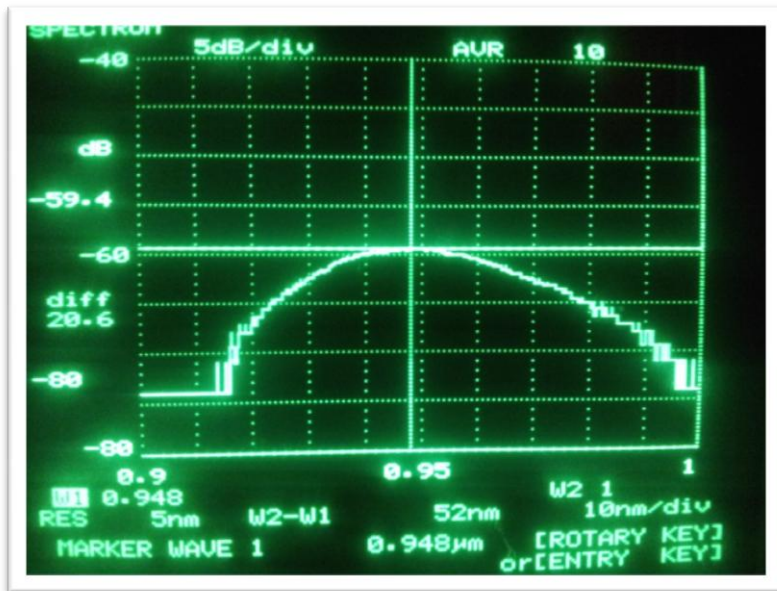


Figura 5.41: Espectro LED 6 – Longitud de onda

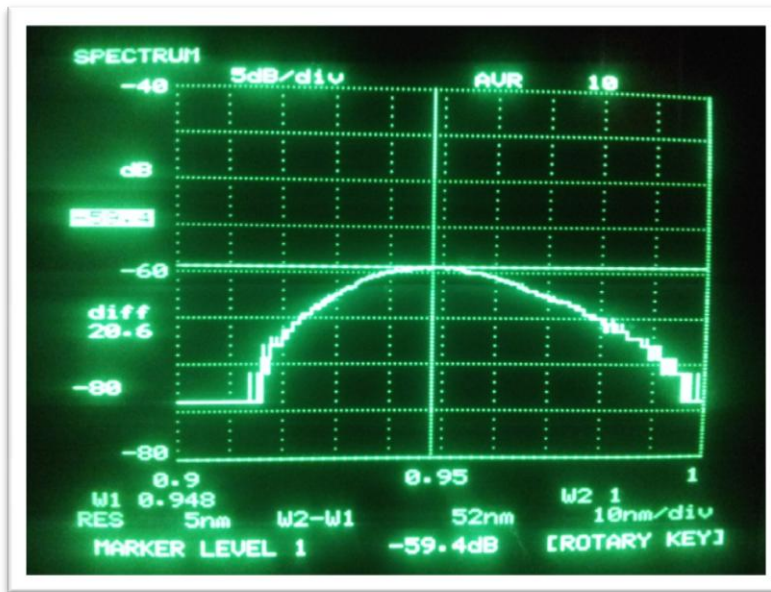


Figura 5.42: Espectro LED 6 – Nivel de señal

Medidas

Una vez realizado el proceso de medida de la constante de Planck en los seis LED, el equipo realiza diversos cálculos de manera automática.

Primero muestra por pantalla la constante de Planck teórica. (Ver figura 5.43)



Figura 5.43: Constante de Planck teórica

Una vez mostrada la constante de Planck teórica, calcula la constante de Planck media con las seis constantes calculadas anteriormente que ha ido almacenando internamente en el código. (Ver figura 5.44)



Figura 5.44: Constante de Planck media calculada

Para el cálculo del error absoluto que se muestra por pantalla a continuación de la constante de Planck media, el Arduino realiza el siguiente cálculo:

$$Error_{absoluto} = |Cte\ de\ Planck_{teórica} - Cte\ de\ Planck_{media}|$$



Figura 5.45: Error absoluto

Calculado el error absoluto, el Arduino calcula el error relativo de la siguiente forma:

$$Error_{relativo} = 100 * \frac{Error_{absoluto}}{Cte\ de\ Planck_{teórica}}$$



Figura 5.46: Error relativo

A continuación, el Arduino va comparando la desviación de las constantes de Planck de cada LED con la constante de Planck teórica, y muestra por pantalla cual es el LED que ha obtenido una medida de constante de Planck más desviada de la teórica.



Figura 5.47: LED con máxima desviación

Final de programa

Una vez realizado el cálculo de las anteriores medidas, el programa se da por finalizado, por lo que el Arduino resetea la batería de LEDs (Ver figura 5.48), retrocediendo el movimiento antes realizado hasta llegar a enfrentar el primer LED a la fibra óptica (Ver figura 5.49), para de esta manera poder realizar de nuevo todo el proceso de medida de la constante de Planck.



Figura 5.48: Reinicio de LEDs

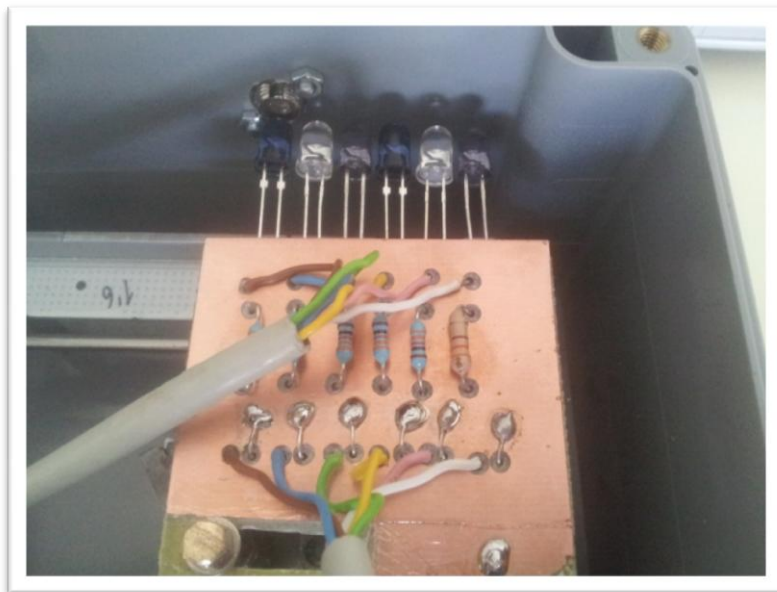


Figura 5.49: LEDs reiniciados

Capítulo VI:

Presupuesto

VI. PRESUPUESTO

La creación del equipo de medida automática de la constante de Planck ha acarreado una serie de gastos que se desarrollarán a continuación.

En el presupuesto próximamente descrito no se ha incluido los gastos de materiales tales como cables de conexión (se obtuvieron de forma gratuita de retales de cables de empresas de comunicación) tornillos de sujeción, estaño, fundas termoretráctiles, o la disponibilidad de herramientas tales como limas, taladradora, soldador, alicates... Todos estos materiales los tenía en mi principal lugar de trabajo, mi casa.

Como en la gran parte del proyecto, el presupuesto se ha dividido en los seis grandes bloques. A la hora de hablar del bloque de control de motor no se ha tenido en cuenta el motor, pues este se consiguió de manera gratuita de un lector de CD de ordenador que se iba a desechar.

Arduino

Componente	Cantidad	Precio (€)	P. TOTAL (€)
Arduino MEGA2560	1	33,8843	33,8843
TOTAL			33,8843

Tabla 6.1: Presupuesto del Arduino

Sistema de iluminación LED

Componente	Cantidad	Precio (€)	P. TOTAL (€)
Diodo LED 5mm Infrarrojo	6	0,2066	1,2396
Resistencias 330Ω	6	0,0180	0,036
TOTAL			1,2756

Tabla 6.2: Presupuesto del sistema de iluminación LED

Sistema de control mecánico de LEDs

Componente	Cantidad	Precio (€)	P. TOTAL (€)
Easydriver motor paso a paso	1	11,9008	11,9008
TOTAL			11,9008

Tabla 6.3: Presupuesto del sistema de control mecánico de LEDs

Pantalla LCD

Componente	Cantidad	Precio (€)	P. TOTAL (€)
Display 16x2	1	13,95	13,95
Potenciómetro 10K	1	0,7085	0,7085
Botón de potenciómetro	1	0,8442	0,8442
Tapa botón de potenciómetro	1	0,1134	0,1134
Diodo LED 5mm Verde	1	0,0350	0,0350
Resistencia 330Ω	1	0,018	0,018
TOTAL			15,6691

Tabla 6.4: Presupuesto de la pantalla LCD

Sistema de interrupciones

Componente	Cantidad	Precio (€)	P. TOTAL (€)
Pulsador	1	0,6612	0,6612
Circuito integrado HEF40106BP	1	0,2000	0,2000
Diodo LED 5mm Rojo	1	0,1653	0,1653
Resistencia 10KΩ	1	0,0180	0,0180
Resistencia 330Ω	1	0,0180	0,0180
TOTAL			1,0625

Tabla 6.5: Presupuesto del sistema de interrupciones

Sistema de alimentación

Componente	Cantidad	Precio (€)	P. TOTAL (€)
Interruptor encendido	1	2,5200	2,5200
Borna Rojo	2	1,3680	2,7360
Borna Negro	2	1,3680	2,7360
Regulador de tensión 12V	2	0,1850	0,3700
Condensador 10uF	2	0,0603	0,1206
Condensador 100nF	2	0,0310	0,0620
Condensador 10nF	2	0,0602	0,1204
Condensador 1nF	2	0,0900	0,1800
TOTAL			6,1090

Tabla 6.6: Presupuesto del sistema de alimentación

Miscelánea

Componente	Cantidad	Precio (€)	P. TOTAL (€)
Placa c. impreso positiva	1	2,7290	2,7290
Caja estanca ABS 265x185x95mm	1	21,6529	21,6529
Separador hexagonal	13	0,1695	2,2035
TOTAL			26,5854

Tabla 6.7: Presupuesto de la miscelánea

TOTAL

Sistema	Precio (€)		
Arduino	33,8843		
Iluminación LED	1,2756		
Control mecánico	11,9008		
Pantalla LCD	15,6691		
Interrupción	1,0625		
Alimentación	6,1090		
Miscelánea	26,5854		
	Base imponible	IVA (21%)	TOTAL EUROS
	96,4867	20,2622	116,7489

Tabla 6.8: Presupuesto TOTAL

Capítulo VII:

Conclusiones

VII. CONCLUSIONES

En este proyecto fin de carrera se ha diseñado y montado un equipo de medida lo más automático posible, que mediante los principios teóricos de funcionamiento de los diodos LED pudiese realizar la medida de la constante de Planck para diversas fuentes LED.

En un principio se planteó realizar la construcción del equipo de medida con un microcontrolador PIC. Se realizó toda la simulación con un programa de simulación de PICs llamado Proteus, y se realizó todo el código de programación del PIC con todos los esquemas de los diferentes sistemas de medida.

Cuando se solicitó en la Universidad un programador para el modelo de PIC que se pretendía utilizar, un 16F877A, se demostró que, primero, ese modelo de PIC no estaba capacitado para almacenar un código tan complejo, y que segundo, al precisar de un PIC más potente, no se disponía del programador necesario en la Universidad.

Cerrándose la vía de utilización de microcontroladores PIC se barajó la posibilidad de utilizar otro tipo de placas controladoras con las que se estaba realizando laboratorios en la Universidad. La complejidad de estas placas controladoras, supuso un gran inconveniente en cuanto a su utilización.

Hablando con diversas personas de mi entorno, se presentó la posibilidad de utilizar la placa controladora Arduino, que con posterioridad, se demostró que fue un acierto su selección.

Esta placa controladora tenía un principio de funcionamiento similar a la de los controladores PIC, con un lenguaje de programación no excesivamente diferente. Además, el esquema de utilización de puertos tenía grandes similitudes con el del PIC.

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento de los diversos sistemas por separado se pasó a realizar el montaje del equipo en su caja final.

En un principio, el funcionamiento del equipo consistía en que un LED, al recibir un aumento de tensión, iría aumentando su luz hasta llegar a su tensión máxima de funcionamiento. En ese momento, el LED dejaría de admitir tensión y la luz permanecería constante. Al medir la potencia lumínica del LED con un medidor de potencia, se podría determinar el momento en el que el LED llegaba a ese punto de

Conclusiones

máxima tensión. En ese momento se activaría la interrupción externa del Arduino por medio del pulsador, y la placa controlador Arduino mediría la tensión de alimentación máxima, calculando la constante de Planck. El problema surgió cuando al necesitar una resistencia en serie con el LED, aunque la tensión en el LED quedaba fija, la tensión que caía en la resistencia seguía aumentando, y por consiguiente su corriente. Como la corriente en la rama aumentaba, la luz en el LED seguía aumentando hasta llegar al punto de saturación del LED.

En ese momento, el planteamiento inicial del equipo de medida de la constante de Planck no servía.

Para poder solucionar el grave problema que se planteaba se volvió a plantear el experimento de medida de la constante de Planck desde su base. En este experimento, si el usuario es capaz de medir la tensión en bornas del LED, se dará cuenta que en un momento determinado esta tensión no varía, por lo que si hubiese alguna forma de indicar al Arduino esa tensión, sin necesidad de utilizar la potencia lumínica y sin necesidad de interferencia externa, el equipo de medida funcionaría de forma aún más automática de lo que se había planteado en un principio. Se realizaron diversas pruebas con las entradas analógicas y se demostró que con una programación adecuada era posible indicarle la tensión de funcionamiento del LED al Arduino. De esta forma se soliviantaba el mayor inconveniente que se había planteado desde el principio del proyecto: la necesidad de una interrupción externa para medir la corriente.

Solucionado el problema de indicarle al Arduino el valor de la tensión necesario para el cálculo de la constante de Planck, se llegaba a un punto en el que todo el sistema de interrupción diseñado no tenía utilidad. Pero se planteó que sería interesante poder dar la opción al usuario de visualizar el espectro de emisión de los diversos LED. En ese momento, el sistema de interrupción volvía a ganar importancia. Si se era capaz de mantener la tensión de alimentación del LED utilizado para hallar la constante de Planck, se podría permitir al usuario la solicitada visualización del espectro del LED en un analizador óptico. De esta forma, si se utilizaba un sistema de alimentación con un bucle infinito, para disponer de todo el tiempo que se precisase, se necesitaba una forma de indicar al Arduino que ya se había observado el LED y se quería pasar al siguiente. Se programó la interrupción externa por medio del pulsador, para que en vez de realizar la medida de tensión, permitiese saltar de la rutina de alimentación al programa principal y así, seleccionar el siguiente LED.

Conclusiones

El equipo de media automático de la constante de Planck diseñado y construido en este proyecto fin de carrera tiene los asumibles errores asociados a la construcción manual de un equipo.

Si se fuese capaz de realizar una construcción más precisa del equipo, con unos sistemas de medida y calibrado más profesionales, se podría realizar un sistema de iluminación LED más preciso. De esta forma, se podría enfrentar los LEDs a la fibra óptica con mayor precisión, consiguiendo una potencia lumínica mayor.

Por otra parte, la principal mejora que se podría realizar al equipo sería la implementación de un sistema de potencia que permitiese una alimentación de los diodos de entre 0 y 10Vc. Si el rango de alimentación fuese mayor al actual, se permitiría la utilización de LEDs rojos y naranjas, que debido a la pérdida de tensión en las resistencias de polarización de los LEDs, es imposible implementar.

Si se diseñase un sistema de alimentación externo al Arduino que permitiese la utilización de fuentes LED que precisan de una alimentación mayor, sería interesante la utilización de un analizador de espectros ópticos que admitiese un rango mayor de longitud de onda que el actual disponible en el laboratorio. Así, se podría utilizar fuentes LED de longitudes de onda asociadas a los colores verde, azul, violeta, ultravioleta...demostrando que el experimento es posible para longitudes de onda menores que las infrarrojas.

Aún con todo lo planteado anteriormente, considero que el equipo de media automático realizado en este proyecto fin de carrera es todo lo posiblemente completo que se podía, teniendo en cuenta todas las dificultades y pérdidas de largas horas de trabajo que se han debido de sortear.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Shubert E. F., LIGHT-EMITTING DIODES, Ed. Cambridge, 2006
- [2] Pierret R. F., Semiconductor Device Fundamentals, Ed. Pearson Education, 1996
- [3] Cardona M, Yu P. E, Fundamentals of Semiconductors, Ed. Springer, 2005
- [4] Página oficial de Arduino - <http://arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>
- [5] Wikipedia - http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page
- [6] Página oficial de Virtual Breadboard -
<http://www.virtualbreadboard.com/Main.aspx?TAB=5>
- [7] “All in 1 LED Lighting Solution Guide”, philipslumileds.com, p 15.
- [8] Del Casar, M. A., Tema I: Fuentes ópticas – Diodos emisores de luz (LED) – Comunicaciones ópticas - Curso 2011-2012
- [9] Departamento de Tecnología Fotónica y Bioingeniería de la UPM -
<http://www.tfo.upm.es>

ANEXO 1:

Datasheet

Unit : mm

Shape of Terminals
Tab Terminal #187

Inside Connection

Panel Thickness	A	B
1	13 ^{+0.2}	19.1 ^{+0.2}
1.5		19.2 ^{+0.2}
2		19.4 ^{+0.2}
2.5		19.6 ^{+0.2}

Approvals		
UL	File No.	E43907
CSA	File No.	LR26920

DATA SHEET

Model No.

DS-850K-F1- LR (Red LED)
LG (Green LED)

Rocker Switch

Specifications :

Rating : 5A.125V. AC

3A.250V. AC

Circuit : OFF - ON SPST

Contact Resistance : 20mΩ or less

Insulation Resistance : DC500V Megger
100MΩ or more

Voltage Breakdown : AC2000V (1 minute)

Construction :

	Materials	Finish
①Knob	PA	Black, Grey
②Case	PA	Black, Grey
③Terminal (A)	Copper	Ep-Cu/Ag
④Terminal (B)	Copper	Ep-Cu/Ag
⑤Base	PF	Black
⑥Terminal for Lamp	Phosphor Bronze	Ep-Cu/N1
⑦Transparent plate	Acrylic Resin	Red, Green

Features

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 135 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 x 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 16 MIPS Throughput at 16MHz
 - On-Chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 64K/128K/256KBytes of In-System Self-Programmable Flash
 - 4Kbytes EEPROM
 - 8Kbytes Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles: 10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/ 100 years at 25°C
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
 - Endurance: Up to 64Kbytes Optional External Memory Space
- Atmel® QTouch® library support
 - Capacitive touch buttons, sliders and wheels
 - QTouch and QMatrix® acquisition
 - Up to 64 sense channels
- JTAG (IEEE std. 1149.1 compliant) Interface
 - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
 - Extensive On-chip Debug Support
 - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - Four 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare- and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Four 8-bit PWM Channels
 - Six/Twelve PWM Channels with Programmable Resolution from 2 to 16 Bits (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Output Compare Modulator
 - 8/16-channel, 10-bit ADC (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Two/Four Programmable Serial USART (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte Oriented 2-wire Serial Interface
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 54/66 Programmable I/O Lines (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - 64-pad QFNMLF, 64-lead TQFP (ATmega1281/2561)
 - 100-lead TQFP, 100-ball CBGA (ATmega640/1280/2560)
 - RoHS/Fully Green
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C Industrial
- Ultra-Low Power Consumption
 - Active Mode: 1MHz, 1.8V: 500µA
 - Power-down Mode: 0.1µA at 1.8V
- Speed Grade:
 - ATmega640V/ATmega1280V/ATmega1281V:
 - 0 - 4MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega2560V/ATmega2561V:
 - 0 - 2MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega640/ATmega1280/ATmega1281:
 - 0 - 8MHz @ 2.7V - 5.5V, 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V
 - ATmega2560/ATmega2561:
 - 0 - 16MHz @ 4.5V - 5.5V



8-bit Atmel Microcontroller with 64K/128K/256K Bytes In-System Programmable Flash

ATmega640/V
ATmega1280/V
ATmega1281/V
ATmega2560/V
ATmega2561/V

2549D-AVR-10/2012



Figure 1-1. TQFP-pinout ATmega640/1280/2560



ATmega640/1280/1281/2560/2561

2.2 Comparison Between ATmega1281/2561 and ATmega640/1280/2560

Each device in the ATmega640/1280/1281/2560/2561 family differs only in memory size and number of pins. [Table 2-1](#) summarizes the different configurations for the six devices.

Table 2-1. Configuration Summary

Device	Flash	EEPROM	RAM	General Purpose I/O pins	16 bits resolution PWM channels	Serial USARTs	ADC Channels
ATmega640	64KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1280	128KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega1281	128KB	4KB	8KB	54	6	2	8
ATmega2560	256KB	4KB	8KB	86	12	4	16
ATmega2561	256KB	4KB	8KB	54	6	2	8

2.3 Pin Descriptions

2.3.1 VCC

Digital supply voltage.

2.3.2 GND

Ground.

2.3.3 Port A (PA7..PA0)

Port A is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port A output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port A pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port A pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port A also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on [page 79](#).

2.3.4 Port B (PB7..PB0)

Port B is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port B output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port B pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port B pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port B has better driving capabilities than the other ports.

Port B also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on [page 79](#).

2.3.5 Port C (PC7..PC0)

Port C is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port C output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port C pins that are externally pulled low will source current if the pull-up

ATmega640/1280/1281/2560/2561

resistors are activated. The Port C pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port C also serves the functions of special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on [page 82](#).

2.3.6 Port D (PD7..PD0)

Port D is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port D output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port D pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port D pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port D also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on [page 83](#).

2.3.7 Port E (PE7..PE0)

Port E is an 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port E output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port E pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port E pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port E also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on [page 86](#).

2.3.8 Port F (PF7..PF0)

Port F serves as analog inputs to the A/D Converter.

Port F also serves as an 8-bit bi-directional I/O port, if the A/D Converter is not used. Port pins can provide internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port F output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port F pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port F pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running. If the JTAG Interface is enabled, the pull-up resistors on pins PF7(TDI), PF5(TMS), and PF4(TCK) will be activated even if a reset occurs.

Port F also serves the functions of the JTAG Interface.

2.3.9 Port G (PG5..PG0)

Port G is a 6-bit I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port G output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port G pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port G pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port G also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/1281/2560/2561 as listed on [page 90](#).

2.3.10 Port H (PH7..PH0)

Port H is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port H output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port H pins that are externally pulled low will source current if the pull-up

ATmega640/1280/1281/2560/2561

resistors are activated. The Port H pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port H also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on [page 92](#).

2.3.11 Port J (PJ7..PJ0)

Port J is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port J output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port J pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port J pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port J also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on [page 94](#).

2.3.12 Port K (PK7..PK0)

Port K serves as analog inputs to the A/D Converter.

Port K is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port K output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port K pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port K pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port K also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on [page 96](#).

2.3.13 Port L (PL7..PL0)

Port L is a 8-bit bi-directional I/O port with internal pull-up resistors (selected for each bit). The Port L output buffers have symmetrical drive characteristics with both high sink and source capability. As inputs, Port L pins that are externally pulled low will source current if the pull-up resistors are activated. The Port L pins are tri-stated when a reset condition becomes active, even if the clock is not running.

Port L also serves the functions of various special features of the ATmega640/1280/2560 as listed on [page 98](#).

2.3.14 RESET

Reset Input. A low level on this pin for longer than the minimum pulse length will generate a reset, even if the clock is not running. The minimum pulse length is given in "System and Reset Characteristics" on [page 372](#). Shorter pulses are not guaranteed to generate a reset.

2.3.15 XTAL1

Input to the Inverting Oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

2.3.16 XTAL2

Output from the Inverting Oscillator amplifier.

INTEGRATED CIRCUITS

DATA SHEET

For a complete data sheet, please also download:

- The IC04 LOCMOS HE4000B Logic Family Specifications HEF, HEC
- The IC04 LOCMOS HE4000B Logic Package Outlines/Information HEF, HEC

HEF40106B **gates** Hex inverting Schmitt trigger

Product specification
File under Integrated Circuits, IC04

January 1995

Philips
Semiconductors



PHILIPS

Hex inverting Schmitt trigger

HEF40106B gates

DESCRIPTION

Each circuit of the HEF40106B functions as an inverter with Schmitt-trigger action. The Schmitt-trigger switches at different points for the positive and negative-going input signals. The difference between the positive-going voltage (V_P) and the negative-going voltage (V_N) is defined as hysteresis voltage (V_H).

This device may be used for enhanced noise immunity or to "square up" slowly changing waveforms.

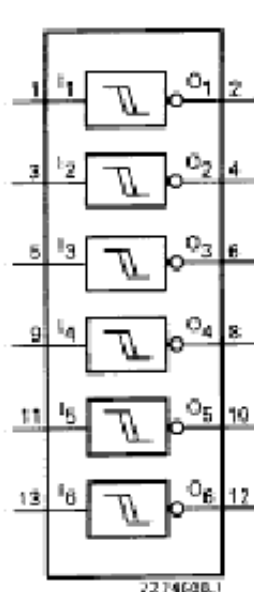


Fig.1 Functional diagram.

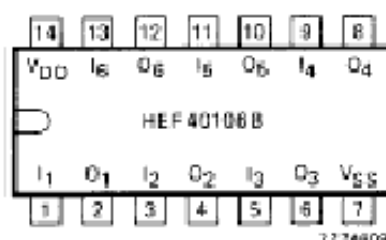


Fig.2 Pinning diagram.

HEF40106BP(N): 14-lead DIL; plastic
(SOT27-1)

HEF40106BD(F): 14-lead DIL; ceramic (cerdip)
(SOT73)

HEF40106BT(D): 14-lead SO; plastic
(SOT108-1)

(): Package Designator North America

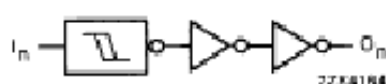


Fig.3 Logic diagram (one inverter).

FAMILY DATA, see LIMITS category GATES

See Family Specifications

Hex inverting Schmitt trigger

HEF40106B
gates

DC CHARACTERISTICS

$V_{SS} = 0\text{ V}$; $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

	V_{DD} V	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.
Hysteresis voltage	5	V_H	0,5	0,8	V
	10		0,7	1,3	V
	15		0,9	1,8	V
Switching levels positive-going input voltage	5	V_P	2	3,0	3,5 V
	10		3,7	5,8	7 V
	15		4,9	8,3	11 V
negative-going input voltage	5	V_N	1,5	2,2	3 V
	10		3	4,5	6,3 V
	15		4	6,5	10,1 V

Hex inverting Schmitt trigger

HEF40106B
gates

AC CHARACTERISTICS

$V_{SS} = 0\text{ V}$; $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; $C_L = 50\text{ pF}$; input transition times $\leq 20\text{ ns}$

	V_{DD} V	SYMBOL	TYP.	MAX.	TYPICAL EXTRAPOLATION FORMULA
Propagation delays $I_n \rightarrow O_n$ HIGH to LOW	5	t_{PHL}	90	180 ns	63 ns + (0,55 ns/pF) C_L
	10		35	70 ns	24 ns + (0,23 ns/pF) C_L
	15		30	60 ns	22 ns + (0,16 ns/pF) C_L
LOW to HIGH	5	t_{PLH}	75	150 ns	48 ns + (0,55 ns/pF) C_L
	10		35	70 ns	24 ns + (0,23 ns/pF) C_L
	15		30	60 ns	22 ns + (0,16 ns/pF) C_L
Output transition times HIGH to LOW	5	t_{THL}	60	120 ns	10 ns + (1,0 ns/pF) C_L
	10		30	60 ns	9 ns + (0,42 ns/pF) C_L
	15		20	40 ns	6 ns + (0,28 ns/pF) C_L
LOW to HIGH	5	t_{TLH}	60	120 ns	10 ns + (1,0 ns/pF) C_L
	10		30	60 ns	9 ns + (0,42 ns/pF) C_L
	15		20	40 ns	6 ns + (0,28 ns/pF) C_L

	V_{DD} V	TYPICAL FORMULA FOR P (μW)	
Dynamic power dissipation per package (P)	5	$2\,300 f_i + \sum (f_o C_L) \times V_{DD}^2$	where f_i = input freq. (MHz) f_o = output freq. (MHz) C_L = load capacitance (pF) $\sum (f_o C_L)$ = sum of outputs V_{DD} = supply voltage (V)
	10	$9\,000 f_i + \sum (f_o C_L) \times V_{DD}^2$	
	15	$20\,000 f_i + \sum (f_o C_L) \times V_{DD}^2$	

Hex inverting Schmitt trigger

HEF40106B
gates

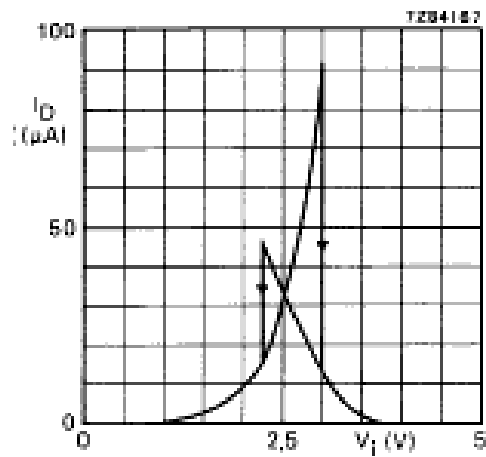


Fig.6 Typical drain current as a function of input voltage; $V_{DD} = 5\text{ V}$; $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

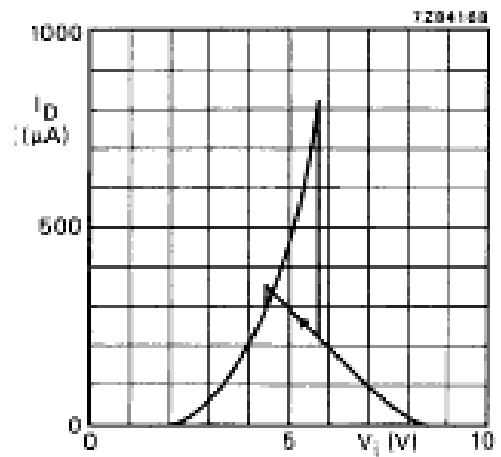


Fig.7 Typical drain current as a function of input voltage; $V_{DD} = 10\text{ V}$; $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

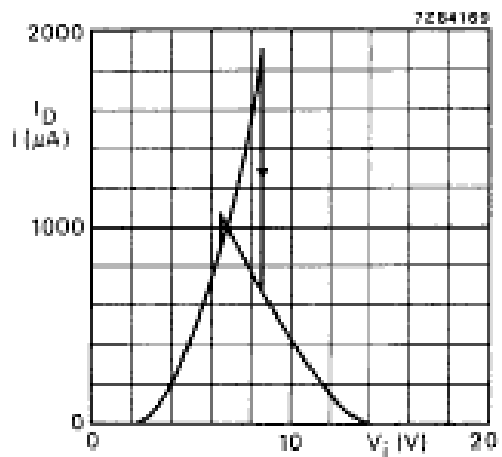


Fig.8 Typical drain current as a function of input voltage; $V_{DD} = 15\text{ V}$; $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

DATASHEET

EVERLIGHT

5mm Infrared LED,T-1 3/4 IR333/H0/L10



Features

- High reliability
- High radiant intensity
- Peak wavelength $\lambda_p=940\text{nm}$
- 2.54mm Lead spacing
- Low forward voltage
- Pb Free
- This product itself will remain within RoHS compliant version.

Description

- EVERLIGHT's Infrared Emitting Diode (IR333/H0/L10) is a high intensity diode , molded in a blue transparent plastic package.
- The device is spectrally matched with phototransistor , photodiode and infrared receiver module.

Applications

- Infrared applied system

Device Selection Guide

Chip Materials	Lens Color
GaAlAs	Blue

Absolute Maximum Ratings (Ta=25℃)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Continuous Forward Current	I_F	100	mA
Peak Forward Current(*1)	I_{FP}	1.0	A
Reverse Voltage	V_R	5	V
Operating Temperature	T_{opr}	-40 ~ +85	℃
Storage Temperature	T_{stg}	-40 ~ +100	℃
Soldering Temperature(*2)	T_{sld}	260	℃
Power Dissipation at (or below) 25℃ Free Air Temperature	P_d	150	mW

Notes: *1: I_{FP} Conditions--Pulse Width $\leq 100\mu s$ and Duty $\leq 1\%$.

*2:Soldering time ≤ 5 seconds.

DATASHEET
5.0mm Infrared LED
IR333/H0/L10

EVERLIGHT

Electro-Optical Characteristics (Ta=25℃)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Condition
Radiant Intensity	I_e	11	12	----	mW/sr	$I_f=20\text{mA}$
		----	45	----		$I_f=100\text{mA}$
Peak Wavelength	λ_p	----	940	----	nm	$I_f=20\text{mA}$
Spectral Bandwidth	$\Delta\lambda$	----	45	----	nm	$I_f=20\text{mA}$
Forward Voltage	V_F	----	1.2	1.5	V	$I_f=20\text{mA}$
		----	1.4	1.8		$I_f=100\text{mA}$
Reverse Current	I_R	----	----	10	μA	$V_R=5\text{V}$
View Angle	2θ1/2	----	40	----	deg	$I_f=20\text{mA}$

Rank

Condition: $I_f=20\text{mA}$

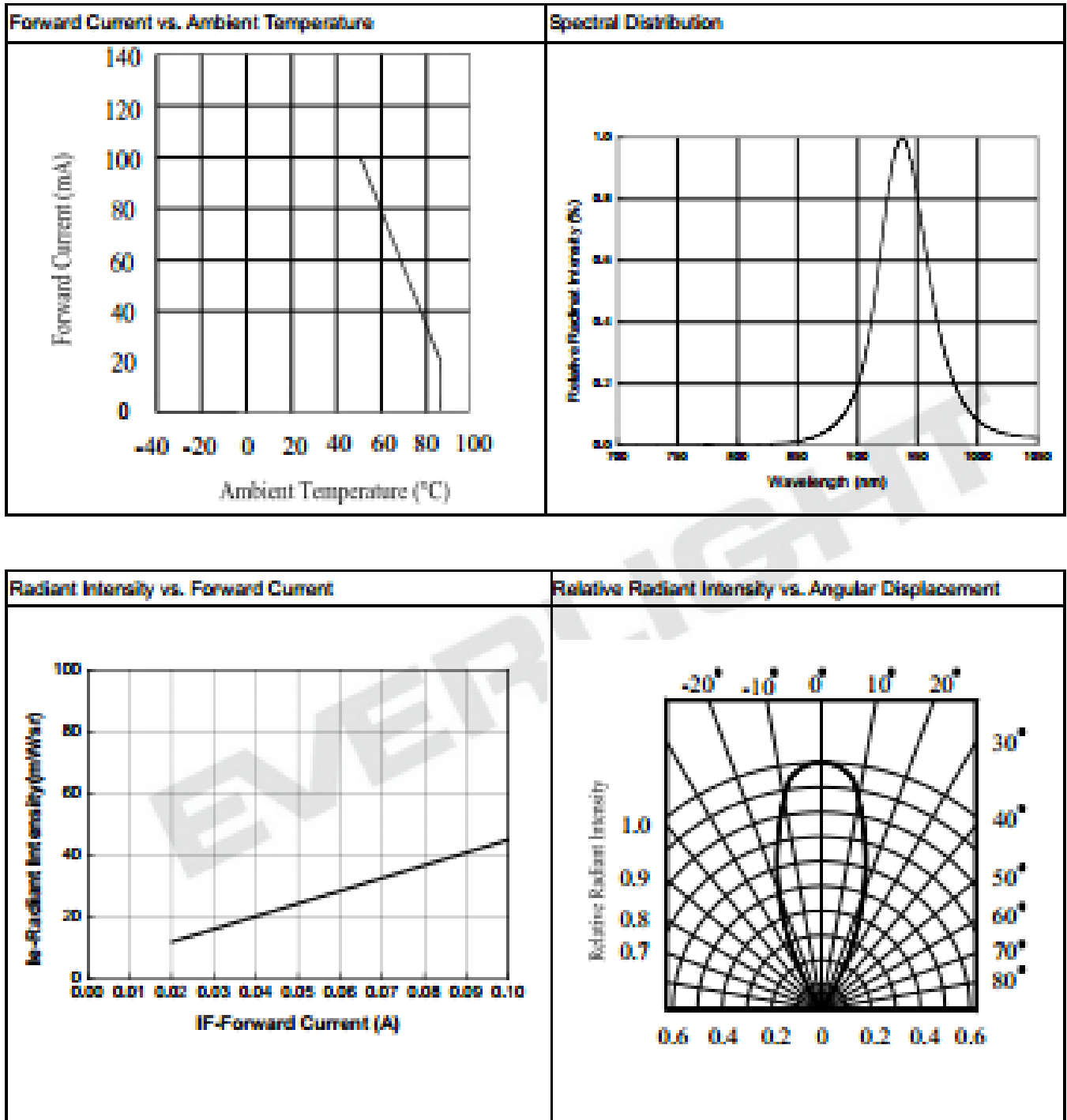
Unit : mW/sr

Bin Number	N	P
Min	11.0	15.0
Max	17.6	24.0

DATASHEET
5.0mm Infrared LED
IR333/H0VL10

EVERLIGHT

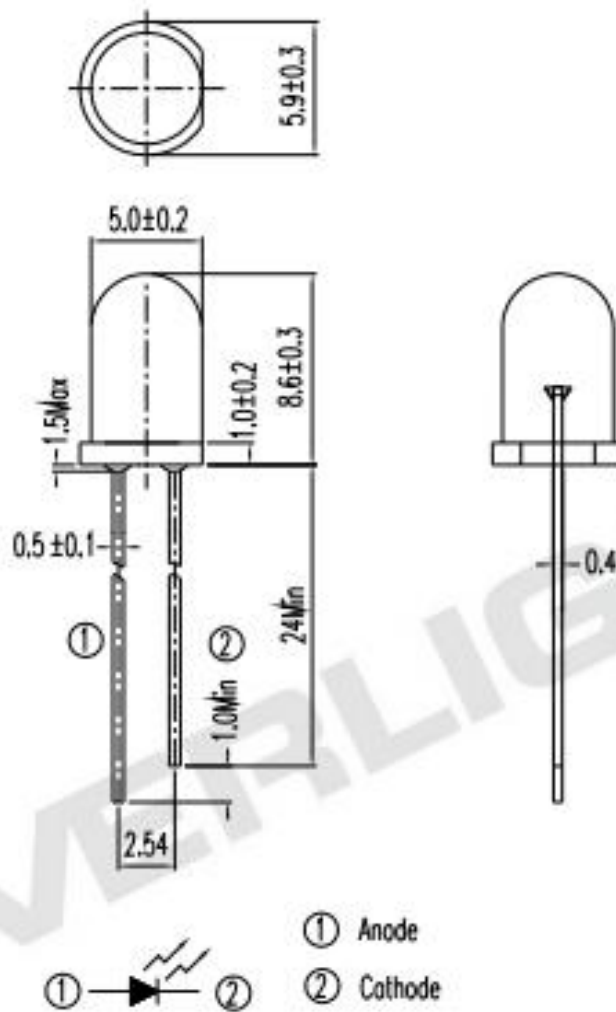
Typical Electro-Optical Characteristics Curves



DATASHEET
5.0mm Infrared LED
IR333/H0/L10

EVERLIGHT

Package Dimension



CONTENTS



AC1602A (16 CHARACTERS x2 LINES)

■ FEATURES

- ◆ 5 x 7 DOTS WITH CURSOR
- ◆ BUILT-IN CONTROLLER (KS0066 OR EQUIVALENT)
- ◆ 5 V POWER SUPPLY
- ◆ 1/16 DUTY CYCLE
- ◆ 4.2 V LED FORWARD VOLTAGE

MECHANICAL DATA

ITEM	DIMENSIONS	UNIT
Module Size (W x H x T)	80 x 36 x 0.8 (12.7 LFD)	mm
Viewing Area (W x H)	65.0 x 16.0	mm
Character Size (W x H)	2.96 x 5.56	mm
Character Pitch (W x H)	3.55 x 5.94	mm
Dot Size (W x H)	0.56 x 0.66	mm
Dot Pitch (W x H)	0.60 x 0.70	mm

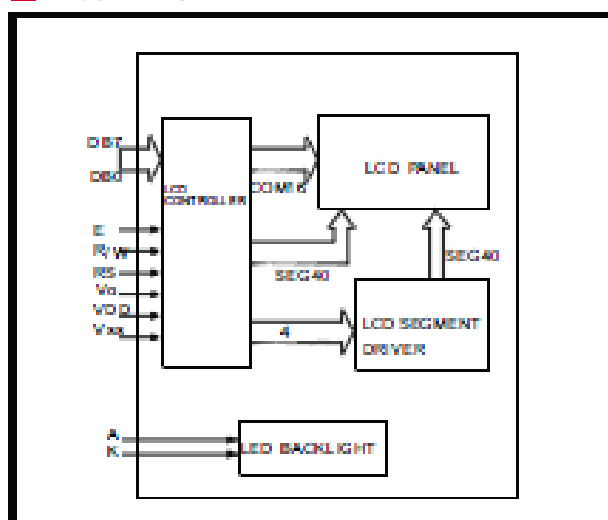
INTERFACE FIN CONNECTIONS

NO.	SYMBOL	FUNCTION	NO.	SYMBOL	FUNCTION
1	V _{DD}	0V	9	DB2	Data Bit 2
2	V _{DD}	5V	10	DB3	Data Bit 3
3	V _{CC}	Contrast Adj.	11	DB4	Data Bit 4
4	RS	Register Select	12	DB5	Data Bit 5
5	R/W	Read/Write	13	DB6	Data Bit 6
6	E	Enable Signal	14	DB7	Data Bit 7
7	DB0	Data Bit 0	15	A	LED Power
8	DB1	Data Bit 1	16	K	LED Power

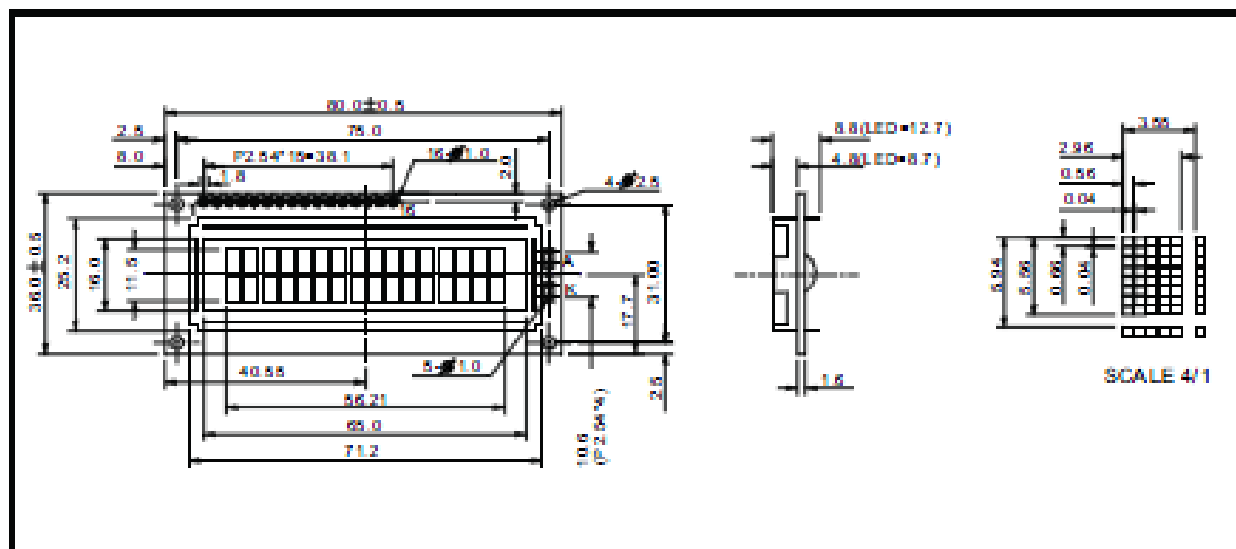
ELECTRICAL CHARACTERISTICS

ITEM		SYMBOL	CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNIT
LCD Operating Voltage		V _{DD-V0}	T=0 °C	-	4.8	-	V
			T=25 °C	-	4.5	-	V
			T=50 °C	-	4.2	-	V
Supply Voltage		V _{DD-V0}	-	4.7	5	5.3	V
Supply Current		I _{DD}	-	-	2	4	mA
Input Voltage	"HIGH" Level	V _{ih}	-	2.2	-	V _{DD}	V
	"LOW" Level	V _{il}	-	0	-	0.6	V
Output Voltage	"HIGH" Level	V _{oh}	-	2.4	-	-	V
	"LOW" Level	V _{ol}	-	-	-	0.4	V

BLOCK DIAGRAM



EXTERNAL DIMENSIONS





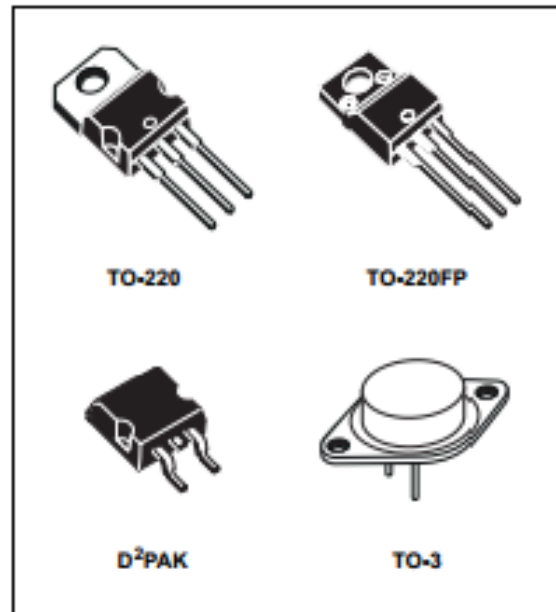
L7800 SERIES

POSITIVE VOLTAGE REGULATORS

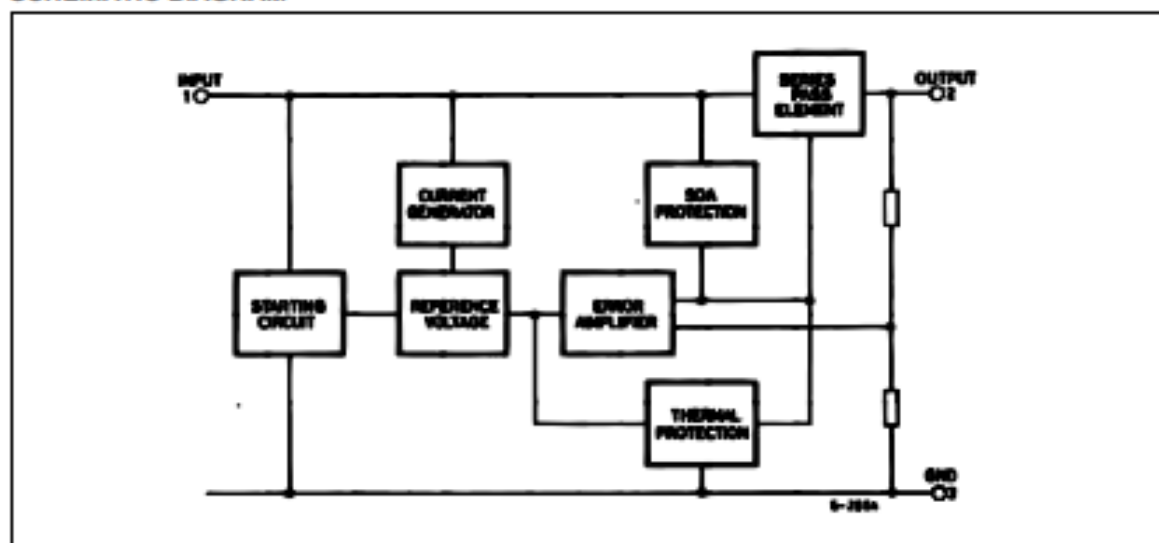
- OUTPUT CURRENT TO 1.5A
- OUTPUT VOLTAGES OF 5; 5.2; 6; 8; 8.5; 9; 12; 15; 18; 24V
- THERMAL OVERLOAD PROTECTION
- SHORT CIRCUIT PROTECTION
- OUTPUT TRANSITION SOA PROTECTION

DESCRIPTION

The L7800 series of three-terminal positive regulators is available in TO-220, TO-220FP, TO-3 and D²PAK packages and several fixed output voltages, making it useful in a wide range of applications. These regulators can provide local on-card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. Each type employs internal current limiting, thermal shut-down and safe area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltage and currents.



SCHEMATIC DIAGRAM



L7800 SERIES

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

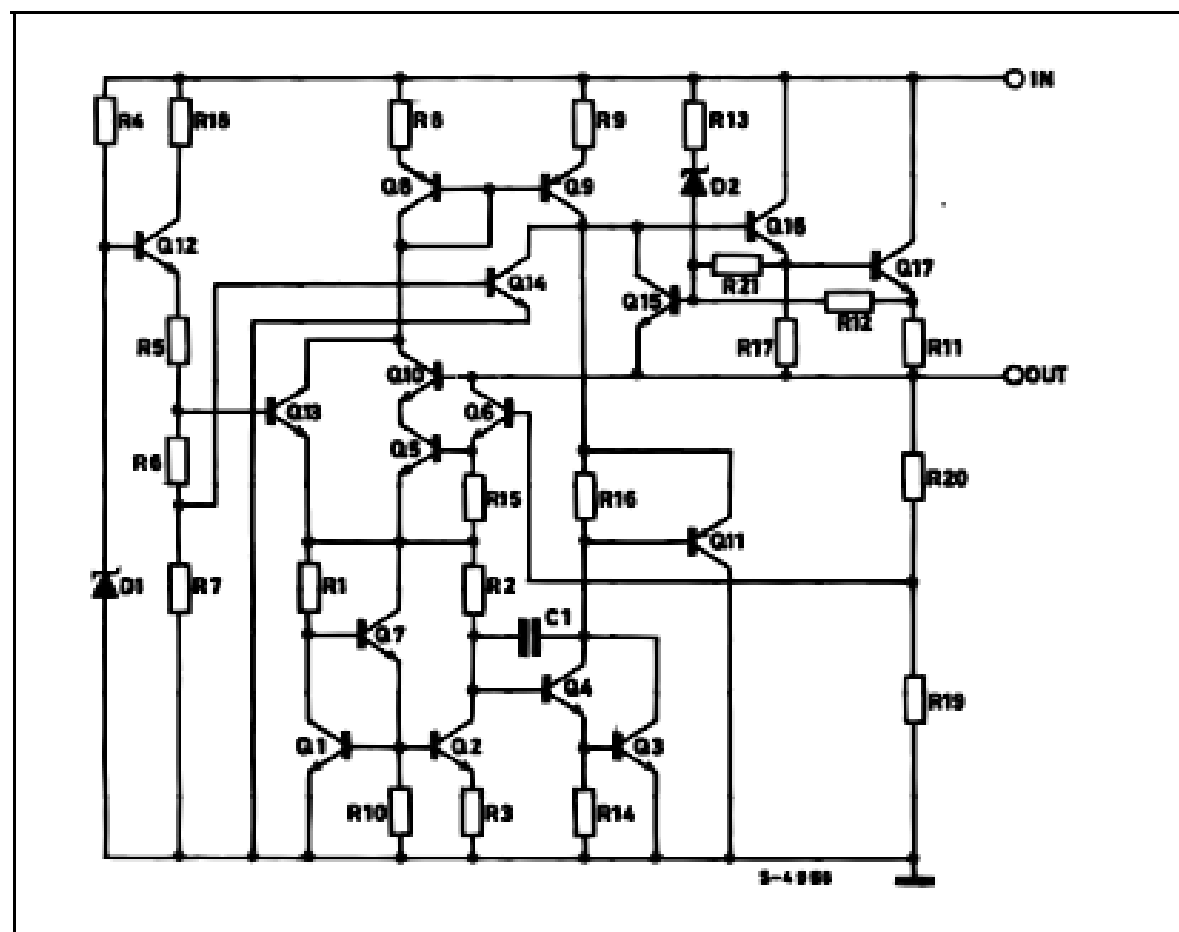
Symbol	Parameter ^a		Value	Unit
V_I	DC Input Voltage	for $V_O = 5$ to $18V$	35	V
		for $V_O = 20, 24V$	40	
I_O	Output Current		Internally Limited	
P_{tot}	Power Dissipation		Internally Limited	
T_{stg}	Storage Temperature Range		-65 to 150	°C
T_{op}	Operating Junction Temperature Range	for L7800	-55 to 150	°C
		for L7800C	0 to 150	

Absolute Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation under these condition is not implied.

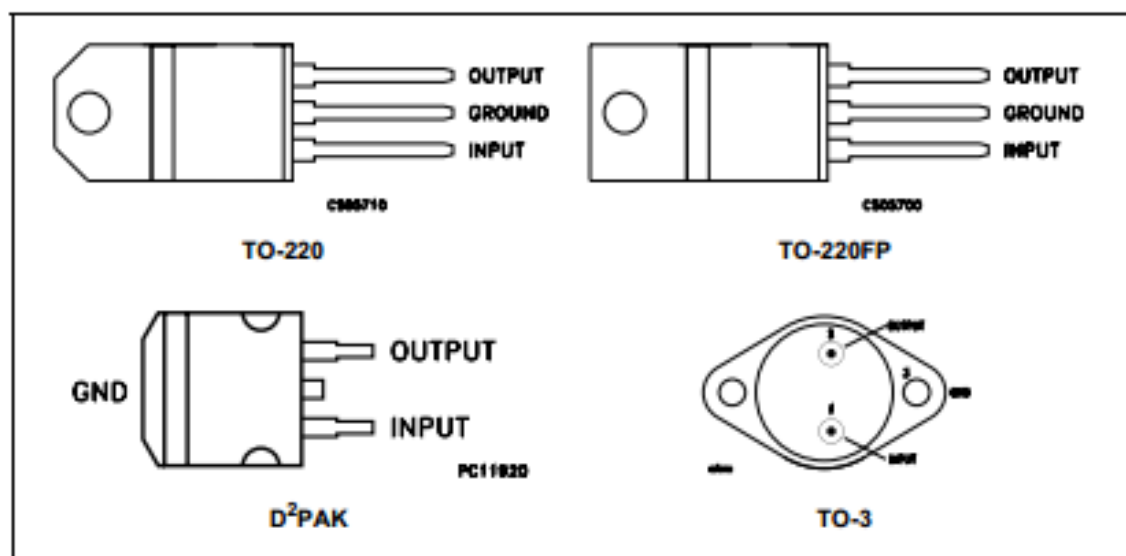
THERMAL DATA

Symbol	Parameter	D ² PAK	TO-220	TO-220FP	TO-3	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case Max	3	5	5	4	°C/W
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient Max	62.5	50	60	35	°C/W

SCHEMATIC DIAGRAM



CONNECTION DIAGRAM (top view)



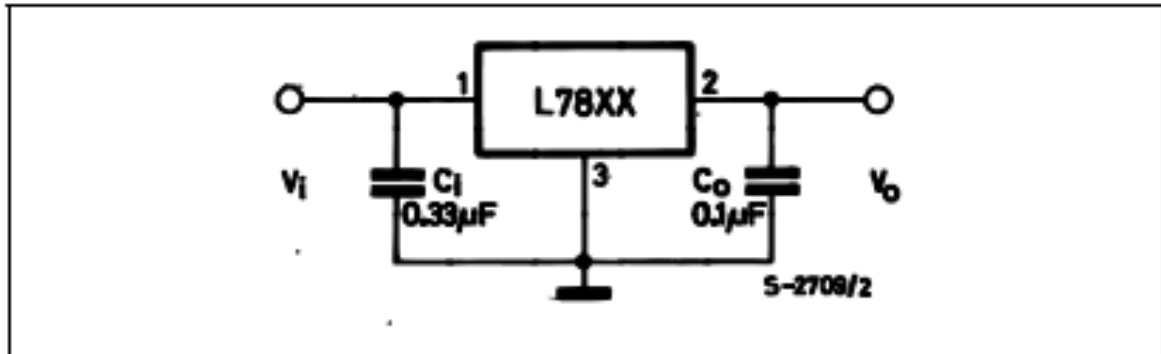
ORDERING CODES

TYPE	TO-220	D²PAK (*)	TO-220FP	TO-3	OUTPUT VOLTAGE
L7805				L7805T	5 V
L7805C	L7805CV	L7805CD2T	L7805CP	L7805CT	5 V
L7852C	L7852CV	L7852CD2T	L7852CP	L7852CT	5.2 V
L7806				L7806T	6 V
L7806C	L7806CV	L7806CD2T	L7806CP	L7806CT	6 V
L7808				L7808T	8 V
L7808C	L7808CV	L7808CD2T	L7808CP	L7808CT	8 V
L7885C	L7885CV	L7885CD2T	L7885CP	L7885CT	8.5 V
L7809C	L7809CV	L7809CD2T	L7809CP	L7809CT	9 V
L7812				L7812T	12 V
L7812C	L7812CV	L7812CD2T	L7812CP	L7812CT	12 V
L7815				L7815T	15 V
L7815C	L7815CV	L7815CD2T	L7815CP	L7815CT	15 V
L7818				L7818T	18 V
L7818C	L7818CV	L7818CD2T	L7818CP	L7818CT	18 V
L7820				L7820T	20 V
L7820C	L7820CV	L7820CD2T	L7820CP	L7820CT	20 V
L7824				L7824T	24 V
L7824C	L7824CV	L7824CD2T	L7824CP	L7824CT	24 V

(*) Available in Tape & Reel with the suffix *-TR*.

L7800 SERIES

APPLICATION CIRCUITS



TEST CIRCUITS

Figure 1 : DC Parameter

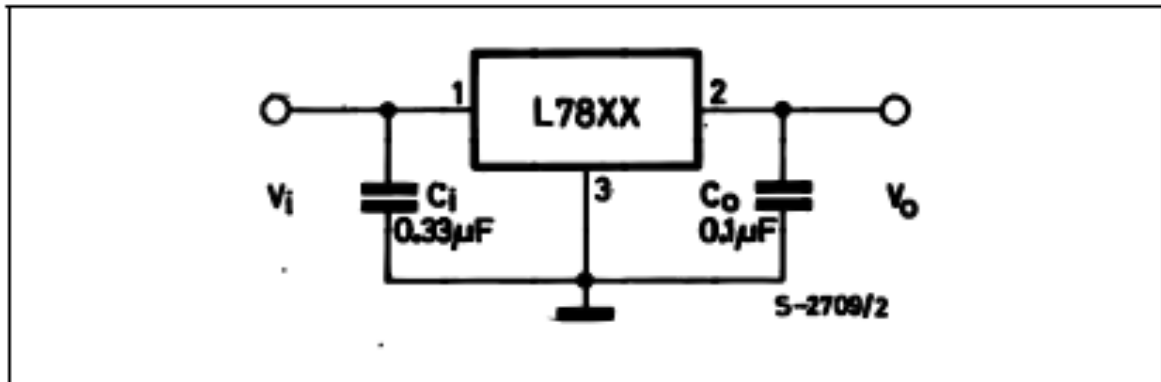
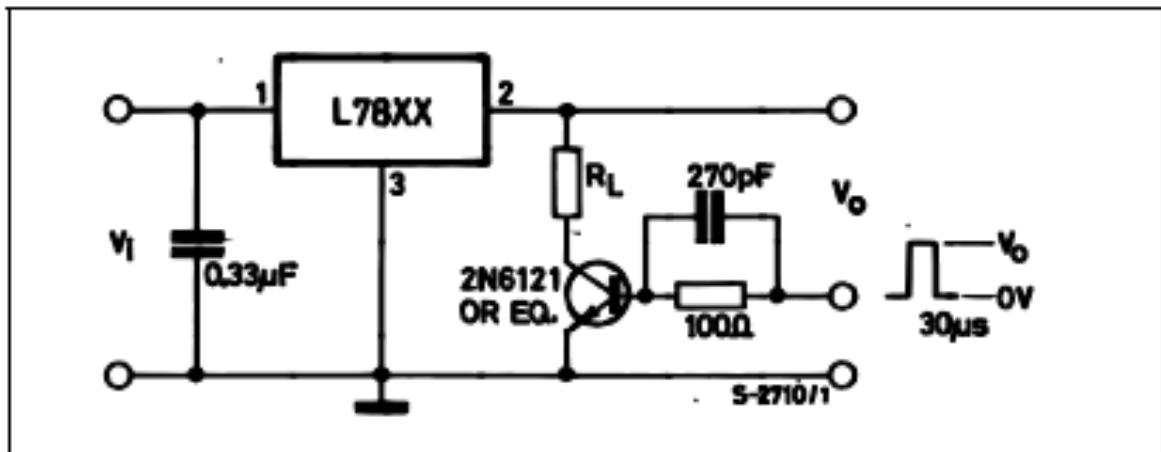


Figure 2 : Load Regulation



L7800 SERIES

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF L7812 (refer to the test circuits, $T_J = -55$ to 150°C , $V_I = 19\text{V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $C_I = 0.33\text{ }\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\text{ }\mu\text{F}$ unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	11.5	12	12.5	V
V_O	Output Voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 15.5\text{ to }27\text{ V}$	11.4	12	12.6	V
$\Delta V_O(^*)$	Line Regulation	$V_I = 14.5\text{ to }30\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			120	mV
		$V_I = 16\text{ to }22\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			60	
$\Delta V_O(^*)$	Load Regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			100	mV
		$I_O = 250\text{ to }750\text{ mA}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			60	
I_d	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			6	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$			0.5	mA
		$V_I = 15\text{ to }30\text{ V}$			0.8	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift	$I_O = 5\text{ mA}$		1.5		mV/ $^\circ\text{C}$
eN	Output Noise Voltage	B = 10Hz to 100KHz $T_J = 25^\circ\text{C}$			40	$\mu\text{V}/V_O$
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_I = 15\text{ to }25\text{ V}$ $f = 120\text{Hz}$	61			dB
V_d	Dropout Voltage	$I_O = 1\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		2	2.5	V
R_O	Output Resistance	$f = 1\text{ KHz}$		18		m Ω
I_{sc}	Short Circuit Current	$V_I = 35\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.75	1.2	A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$	1.3	2.2	3.3	A

(*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF L7812C (refer to the test circuits, $T_J = -55$ to 150°C , $V_I = 19\text{V}$, $I_O = 500\text{ mA}$, $C_I = 0.33\text{ }\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\text{ }\mu\text{F}$ unless otherwise specified).

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_O	Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	11.5	12	12.5	V
V_O	Output Voltage	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$ $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 14.5\text{ to }27\text{ V}$	11.4	12	12.6	V
$\Delta V_O(^*)$	Line Regulation	$V_I = 14.5\text{ to }30\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			240	mV
		$V_I = 16\text{ to }22\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			120	
$\Delta V_O(^*)$	Load Regulation	$I_O = 5\text{ mA to }1.5\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			240	mV
		$I_O = 250\text{ to }750\text{ mA}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$			120	
I_d	Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$			8	mA
ΔI_d	Quiescent Current Change	$I_O = 5\text{ mA to }1\text{ A}$			0.5	mA
		$V_I = 14.5\text{ to }30\text{ V}$			1	
$\Delta V_O/\Delta T$	Output Voltage Drift	$I_O = 5\text{ mA}$		-1		mV/ $^\circ\text{C}$
eN	Output Noise Voltage	B = 10Hz to 100KHz $T_J = 25^\circ\text{C}$		75		$\mu\text{V}/V_O$
SVR	Supply Voltage Rejection	$V_I = 15\text{ to }25\text{ V}$ $f = 120\text{Hz}$	55			dB
V_d	Dropout Voltage	$I_O = 1\text{ A}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		2		V
R_O	Output Resistance	$f = 1\text{ KHz}$		18		m Ω
I_{sc}	Short Circuit Current	$V_I = 35\text{ V}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$		0.35		A
I_{scp}	Short Circuit Peak Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		2.2		A

(*) Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty cycle is used.

Figure 4 : Dropout Voltage vs Junction Temperature

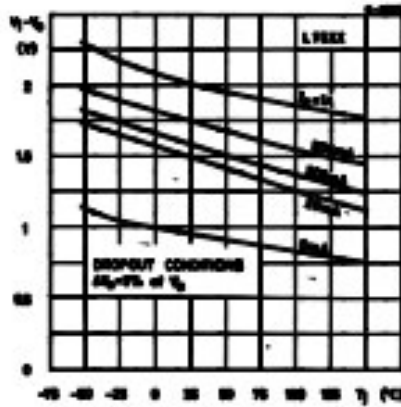


Figure 7 : Output Voltage vs Junction Temperature

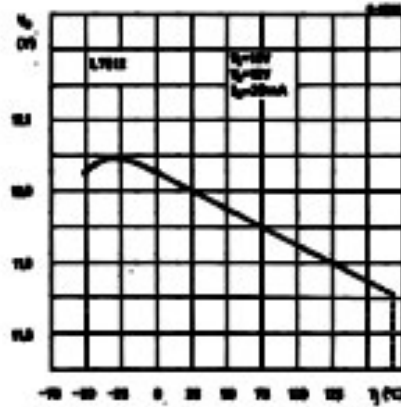


Figure 5 : Peak Output Current vs Input/output Differential Voltage

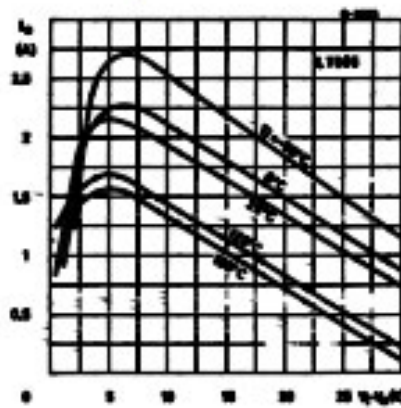


Figure 8 : Output Impedance vs Frequency

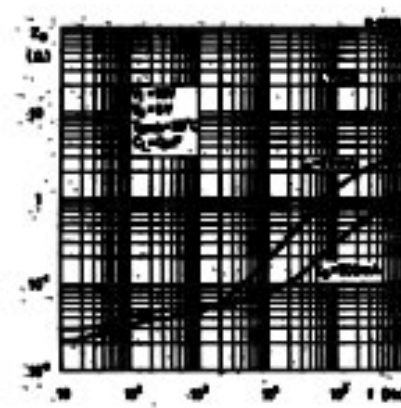


Figure 6 : Supply Voltage Rejection vs Frequency

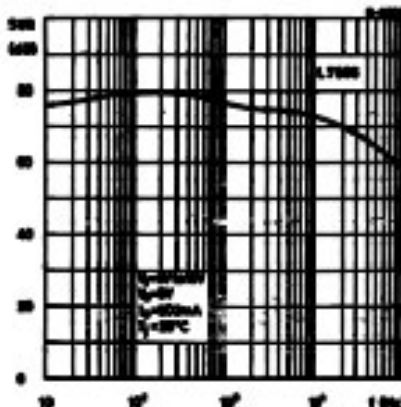
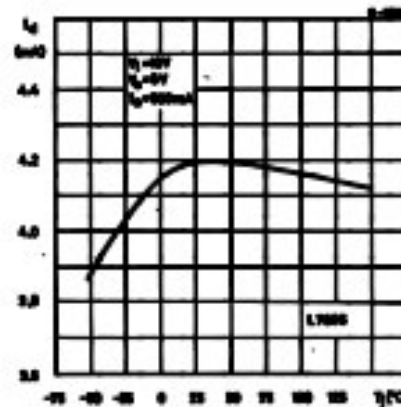


Figure 9 : Quiescent Current vs Junction Temperature



L7800 SERIES

Figure 10 : Load Transient Response

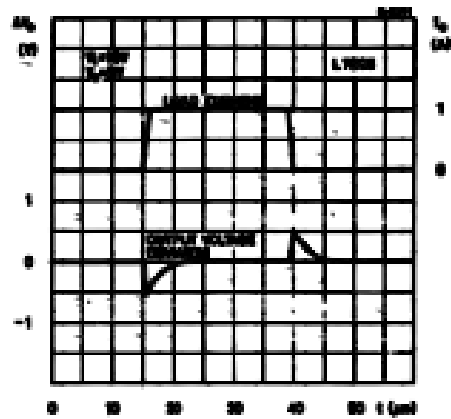


Figure 12 : Quiescent Current vs Input Voltage

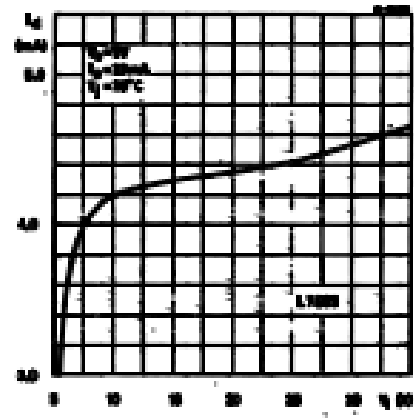


Figure 11 : Line Transient Response

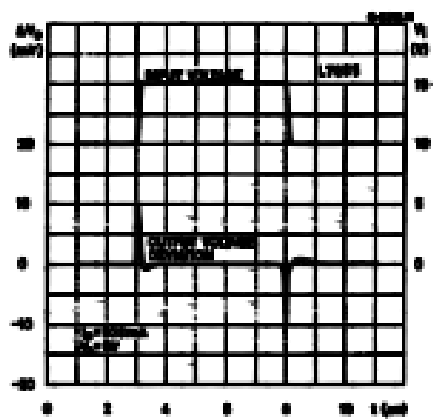
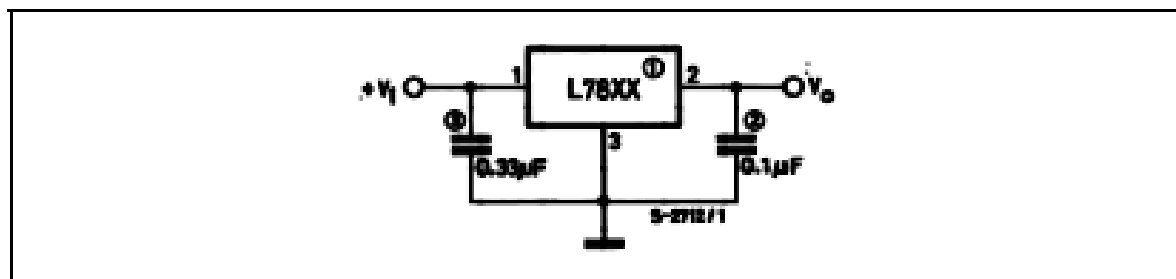


Figure 13 : Fixed Output Regulator

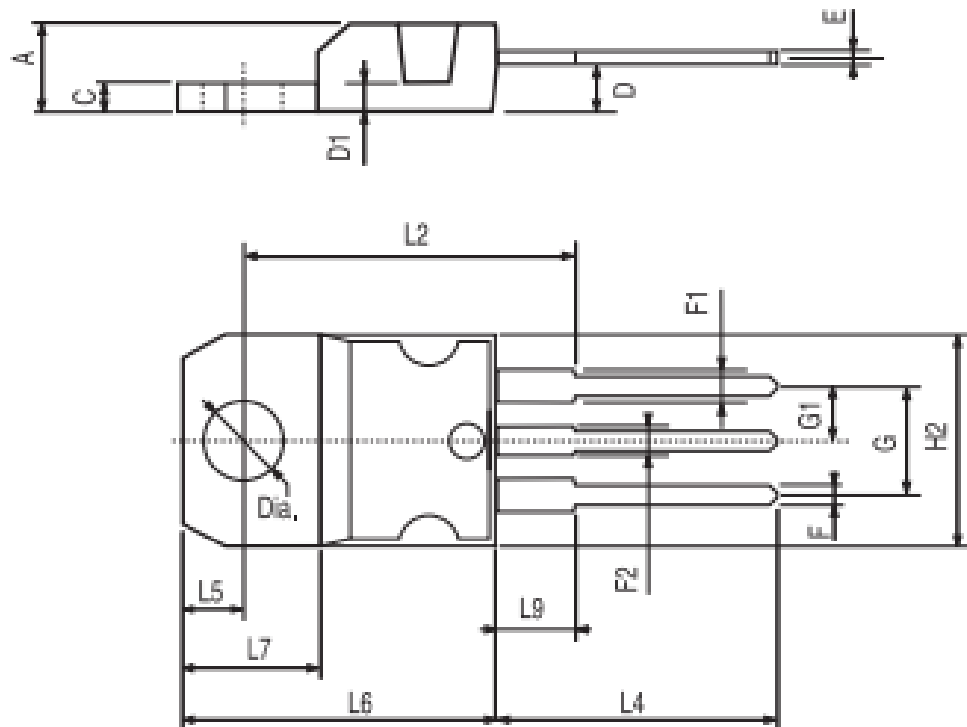


NOTE:

1. To specify an output voltage, substitute voltage value for "XX".
2. Although no output capacitor is needed for stability, it does improve transient response.
3. Required if regulator is located an appreciable distance from power supply filter.

TO-220 MECHANICAL DATA

DIM.	mm.			inch		
	MIN.	TYP	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.40		4.60	0.173		0.181
C	1.23		1.32	0.048		0.051
D	2.40		2.72	0.094		0.107
D1		1.27			0.050	
E	0.49		0.70	0.019		0.027
F	0.61		0.88	0.024		0.034
F1	1.14		1.70	0.044		0.067
F2	1.14		1.70	0.044		0.067
G	4.95		5.15	0.194		0.203
G1	2.4		2.7	0.094		0.106
H2	10.0		10.40	0.393		0.409
L2		16.4			0.645	
L4	13.0		14.0	0.511		0.551
L5	2.65		2.95	0.104		0.116
L6	15.25		15.75	0.600		0.620
L7	6.2		6.6	0.244		0.260
L9	3.5		3.93	0.137		0.154
DIA.	3.75		3.85	0.147		0.151



P011C